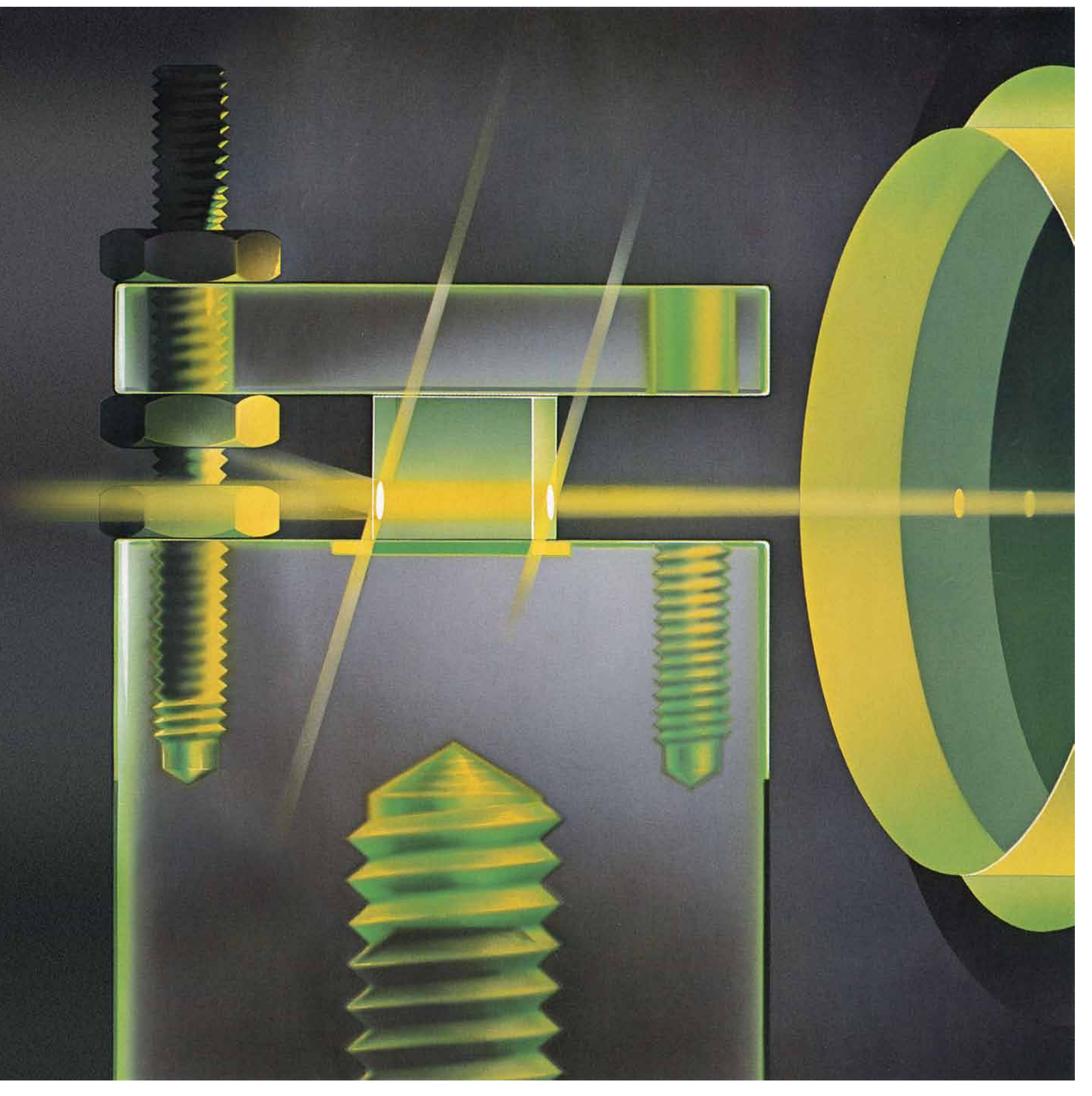
INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN



LUZ TEMPORALMENTE INVERTIDA

Marzo 1986
450 PTAS.
(IVA INCLUIDO)

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 114
Marzo 1986

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica, S.A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

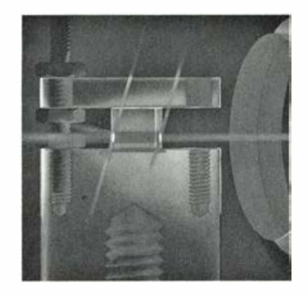
Isabel García Acha y Julio Rodríguez Villanueva: *Crecimiento, diferenciación y remisión del cáncer*; Manuel Puigcerver: *Estructura de la cola de los cometas*; Amando García Rodríguez: *Aplicaciones de la conjugación de fase óptica*; Montserrat Domingo: *Depósitos minerales creados por fuentes termales submarinas*; Manuel Crespo Veigas: *Defensa química de las plantas superiores*; José Miguel Calvo Hernández y Juan Vilchez Bartolomé: *Datación de radiocarbono mediante espectrometría*; Joandomènec Ros Aragonés: *Reconocimiento del parentesco en los renacuajos*; Luis Bou: *Juegos de ordenador*; J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

Julio Salinas y Rafael Gómez-Lus

Libros:

Pedro Laín Entralgo, Carlos Pérez García, Juan José Zarranz, Mariano Artigas, Juan Vernet y Ramón Canal



PORTADA

La portada ilustra un espejo conjugador de fase, dispositivo capaz de corregir las distorsiones ópticas. Dicho espejo devuelve cualquier haz luminoso hasta su lugar de origen en una forma "invertida temporalmente", de manera que dichos rayos de luz recorran de nuevo sus trayectorias originales. Este espejo conjugador de fase está constituido por un cristal de titanato de bario cuyas aristas miden cinco milímetros cada una. El haz de luz procedente del láser de la derecha atraviesa el cristal. Una fracción de la luz emerge del cristal por la izquierda. Sin embargo, la mayor parte de ella interacciona con los átomos del cristal y da lugar a un haz conjugado de fase (invertido temporalmente) que se mueve hacia atraś y vuelve a la derecha. Los haces conjugados de fase pueden utilizarse para compensar la turbulencia atmosférica, realizar funciones de cálculo óptico, investigar la estructura atómica y localizar satélites en movimiento (véase "Aplicaciones de la conjugación de fase óptica", por David M. Pepper, en este mismo número). La ilustración de la portada está basada en un dispositivo experimental diseñado por Ravinder K. Jain, Ross A. McFarlane, Knut E. Stenersen y Cliff W. Olson.

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
08029 Barcelona (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 33-37

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números):
4950 pesetas (IVA incluido)
Extranjero:
Un año (12 números): 35 U.S. $
Ejemplar atrasado ordinario:
450 pesetas (IVA incluido)
Ejemplar atrasado extraordinario:
575 pesetas (IVA incluido)

Distribución para España:
Distribuciones de Enlace, S. A.
Bruch, 49 - 08009 Barcelona

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - 08029 Barcelona

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137 - 28030 Madrid
Teléfonos 430 84 81 - 437 12 91
Cataluña:
Paulino Muñoz Victoria
Comunicación Diaria, S.A.
Aribau, 195, 4.° E - 08021 Barcelona
Teléfono 200 17 58

Controlado
por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Hank Iken

Página	Fuente
13	Jet Propulsion Laboraty, Instituto de Tecnología de California
14-23	Antonio F. Rañada y Magda Mària
25	Leo Sachs, Instituto Weizmann de Ciencias
26-27	Ilil Arbel
28	Leo Sachs, Instituto Weizmann de Ciencias
29-31	Ilil Arbel
34	Observatorio Conjunto de Observación Cometaria
36	Uwe Fink, Universidad de Arizona
37-40	George V. Kelvin, Science Graphics
41	Observatorio Yerkes
42	Edward Bell (*arriba*), Museo Americano de Historia Natural (*abajo*)
44-45	Julio Salinas y Magda Mària
46-47	R. Gómez-Lus
49	Jack Feinberg, Universidad del Sur de California
50-52	Ian Worpole
53	Jack Feinberg y Robert W. Hellwarth, Universidad del Sur de California
54	Gilmore J. Dunning, Richard C. Lind, William C. Keeler y Cliff W. Olson, laboratorios de investigación Hughes
55-58	Ian Worpole
61	Kyung-Ryul Kim, Institución Oceanográfica Scripps
62-63	Andrew Tomko
64-67	Hank Iken
68	Andrew Tomko
71	Isao Kubo, Universidad de California en Berkeley
72-75	Patricia J. Wynne
79	Laboratorio de Investigación Arqueológica y de Historia del Arte, Oxford
80-85	Andrew Christie
87	Andrew R. Blaustein y Richard K. O'Hara, Universidad Oregon
88-93	Tom Prentiss
95	A. K. Dewdney
96-98	Ilil Arbel
99	Observatorios Hale
100-105	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa, S.A.
Pedro IV, 160 - 08005 Barcelona
Fotocromos reproducidos por GINSA, S.A.
Gráfica Elzeviriana, S.A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
08013 Barcelona
Printed in Spain - Impreso en España

Los autores

ANTONIO FERNANDEZ-RAÑADA MENENDEZ DE LUARCA ("Movimiento caótico") es catedrático de mecánica teórica de la Universidad Complutense, donde es también decano de la Facultad de Ciencias Físicas. Tras cursar la carrera en ese mismo centro estudió en París, realizó investigación en la Junta de Energía Nuclear y fue profesor en las universidades de Barcelona y Zaragoza. Ha trabajado en física de partículas elementales y en física matemática. Ha sido director del Grupo Interuniversitario de Física Teórica (GIFT) durante 4 años.

LEO SACHS ("Crecimiento, diferenciación y remisión del cáncer") ocupa la cátedra Otto Meyerhof de biología y es jefe del departamento de genética del Instituto Weizmann de Ciencias de Israel. Se doctoró en genética vegetal por la Universidad de Cambridge en 1951. En 1952 se trasladó al Weizmann, donde fundó el departamento de genética y virología. Además del tema sobre el que versa su artículo, le interesan el diagnóstico prenatal y los mecanismos de la carcinogénesis.

JOHN C. BRANDT y MALCOLM B. NIEDNER, Jr. ("Estructura de la cola de los cometas") pertenecen al laboratorio de astronomía y física espacial del Centro de Vuelos Espaciales Goddard, de la NASA. Desde 1975 han colaborado en trabajos acerca de la macroestructura de los cometas y la física de plasmas relacionada con ella. Brandt obtuvo el doctorado en astronomía por la Universidad de Chicago en 1960. Especialista en cometas de la misión del vehículo espacial *International Cometary Explorer* (Explorador Cometario Internacional) y miembro del grupo Astro-Halley, que controlará el Astro-1, un conjunto de telescopios de luz visible y ultravioleta que en principio se había previsto instalar a bordo del transbordador espacial en marzo de 1986. Niedner es doctor en astronomía por la Universidad de Indiana (1979). Ocupa la secretaría del grupo Astro-Halley.

DAVID M. PEPPER ("Aplicaciones de la conjugación de fase óptica") trabaja como físico en el departamento de óptica de los laboratorios de investigación Hughes. Hijo de supervivientes del holocausto judío, se formó en la Universidad de California en Los Angeles y se doctoró en física aplicada por el Instituto de Tecnología de California en 1980. Además del tema que aborda en su artículo, se interesa por el procesamiento óptico de la información, la electrónica cuántica y la química del láser. Pepper es profesor adjunto de matemática y física de la Universidad Pepperdine.

PETER A. RONA ("Depósitos minerales creados por manantiales termales submarinos") es el decano de los geofísicos de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, además de profesor adjunto de geología marina y geofísica de la Universidad de Miami. Concluido el primer ciclo de carrera en la Universidad de Brown en 1956, se licenció en geología por la de Yale el año siguiente. Trabajó luego en prospección geológica para la Compañía Standard Oil de Nueva Jersey (hoy integrada en la Exxon Corporation). Dos años más tarde consideró que el futuro de las ciencias de la tierra se hallaba bajo los océanos y se trasladó a los laboratorios Hudson de la Universidad de Columbia, para formarse en oceanografía. Recibióse de doctor en geología marina en la Universidad de Yale en 1967. En estos últimos 25 años ha dirigido expediciones oceanográficas del Atlántico, Pacífico e Indico.

GERALD A. ROSENTHAL ("Defensas químicas de las plantas superiores") es profesor de ciencias biológicas y toxicológicas de la Universidad de Kentucky. Asistió a la Universidad estatal de Nueva York en Syracuse, prosiguiendo sus estudios en la de Duke, que le otorgó el doctorado en bioquímica y fisiología vegetal en 1966. Después de colaborar durante tres años con la Universidad Case Western Reserve, se incorporó al claustro docente de Kentucky. Ha sido profesor visitante de la Universidad nacional de Seúl y de la hebrea de Jerusalén. En la actualidad se encuentra en la Universidad Louis Pasteur de Estrasburgo.

ROBERT E. M. HEDGES y JOHN A. J. GOWLETT ("Datación por radiocarbono mediante espectrometría'') comparten idéntico interés por la materia sobre la que versa su artículo si bien arrancando de puntos distintos. Hedges inició su andadura académica como fisicoquímico, especialidad por la que se recibió de doctor en la Universidad de Cambridge en 1968. Se dedicó los siguientes cuatro años a trabajar en ese campo, hasta entrar en el laboratorio de investigación arqueológica y de historia del arte de la Universidad de Oxford. En los 13 años que lleva allí se ha centrado especialmente en la aplicación, a la arqueología, de los avances registrados en química y física. Gowlett es arqueólogo de la unidad de aceleración de radiocarbono de Oxford. Empezó su formación en Cambridge, colaborando en excavaciones de yacimientos prehistóricos y romanos de Gran Bretaña. Licenciado en 1972, se trasladó a continuación a Kenya para efectuar trabajos de campo. De esa experiencia habría de nacer su tesis doctoral, que defendió en Cambridge en 1979. El año siguiente se incorporó a la unidad de aceleración.

ANDREW R. BLAUSTEIN y RICHARD K. O'HARA ("Reconocimiento del parentesco en los renacuajos") son, respectivamente, profesor adjunto e investigador adjunto del departamento de zoología de la Universidad estatal de Oregón. Al acabar el primer ciclo de carrera en 1971, en el Southampton College neoyorquino, Blaustein se trasladó al oeste para completar su formación en ecología del comportamiento. La Universidad de Nevada en Reno constituía un lugar especialmente adecuado para estudiar el comportamiento de los roedores del desierto; por ese centro se licenció en zoología en 1973. En 1978, la Universidad de California en Santa Bárbara le confirió el grado de doctor en biología por sus estudios sobre los aspectos conductuales de la competencia en micromamíferos. Ese mismo año se trasladó a la estatal de Oregón. O'Hara procede de la Universidad estatal de Michigan, por la que se licenció en zoología en 1974, si bien se doctoró también en la estatal de Oregón, donde fijó su residencia para investigar el desarrollo del comportamiento en los organismos y su evolución en las especies.

Hace...

José M.ª López Piñero

...cien años

Jaime Ferrán, Amalio Gimeno e Inocente Paulí publicaron el libro *La inoculación preventiva contra el cólera morbo asiático*, principal texto clásico relativo a un importante hito de la historia de la salud pública mundial: la aplicación inicial de la vacuna anticolérica; primera vacuna, además, que se empleó para inmunizar a seres humanos frente a una enfermedad bacteriana.

"La inoculación preventiva contra el cólera morbo asiático", en la Valencia de 1885 fue posible gracias a la confluencia de los trabajos que en torno al tema estaban efectuando Ferrán y Paulí en Tortosa con los que venía llevando a cabo el grupo encabezado por Gimeno en la misma Valencia. Unos y otros respondían a planteamientos rigurosamente al día, a pesar de que se realizaran en un escenario provinciano, de posición marginal dentro del panorama científico de la época. Por lo demás, tenían características muy diferentes, que conviene destacar para situarlos adecuadamente.

La actividad de Ferrán y Paulí en Tortosa era típicamente extraacadémica. Un médico dedicado entonces fundamentalmente a la oftalmología y un químico, ambos muy jóvenes, desarrollaron una polifacética labor científica y técnica bajo la influencia de un astrónomo y geólogo –José Joaquín Landerer– de formación autodidacta, aunque excepcionalmente bien relacionado con la colectividad científica europea. Comenzaron interesándose por la telefonía y la fotografía, con resultados tan notables como lograr con aparatos de construcción propia una comunicación telefónica entre Tortosa y Tarragona, en 1878, solamente dos años después de la primera comunicación de Graham Bell, y la invención de un procedimiento de fotografía instantánea que dieron a conocer en una monografía publicada en 1879. Sin embargo, acabaron centrándose en la microbiología, motivados inicialmente por la admiración hacia los trabajos de Pasteur, que pudieron seguir puntualmente en la biblioteca de Landerer, cuyo microscopio de petrógrafo les sirvió, por otra parte, para realizar sus primeros ensayos prácticos. A lo largo del lustro 1880-84 se convirtieron en diestros bacteriólogos, pero permaneciendo en un terreno tan práctico como la preparación de vacunas pasteurianas contra el carbunco y el mal rojo del cerdo que alcanzaron difusión dentro y fuera de España. Su primera relación con las instituciones oficiales fue el nombramiento de Ferrán como miembro de la comisión que el Ayuntamiento de Barcelona envió a Marsella en 1884, con motivo de haberse desencadenado el cólera en el sur de Francia. Es muy significativo que Paulí fuera excluido de dicha comisión y tuviera que desplazarse a su costa para seguir colaborando con su amigo en los hospitales para coléricos de Marsella y Tolón, en los trabajos que sirvieron de punto de partida para el descubrimiento de la vacuna anticolérica tras su regreso a Tortosa.

Ferrán mantuvo ese talante el resto de su vida. Recuérdese las circunstancias tormentosas en las que acabó destituido, en 1906, del cargo de director del Laboratorio Microbiológico Municipal de Barcelona, para el que había sido nombrado veinte años antes con la

LA INOCULACIÓN PREVENTIVA

CONTRA EL CÓLERA

1. Dedicatoria de Jaime Ferrán, Inocente Paulí y Amalio Gimeno de un ejemplar de La inoculación preventiva contra el cólera morbo asiático *(1886) a Vicente Peset Cervera, uno de sus principales colaboradores en la vacunación anticolérica del año anterior. Dicho ejemplar se conserva actualmente en el Fondo Peset Llorca, Biblioteca y Museo Historicomédicos de la Universidad de Valencia.*

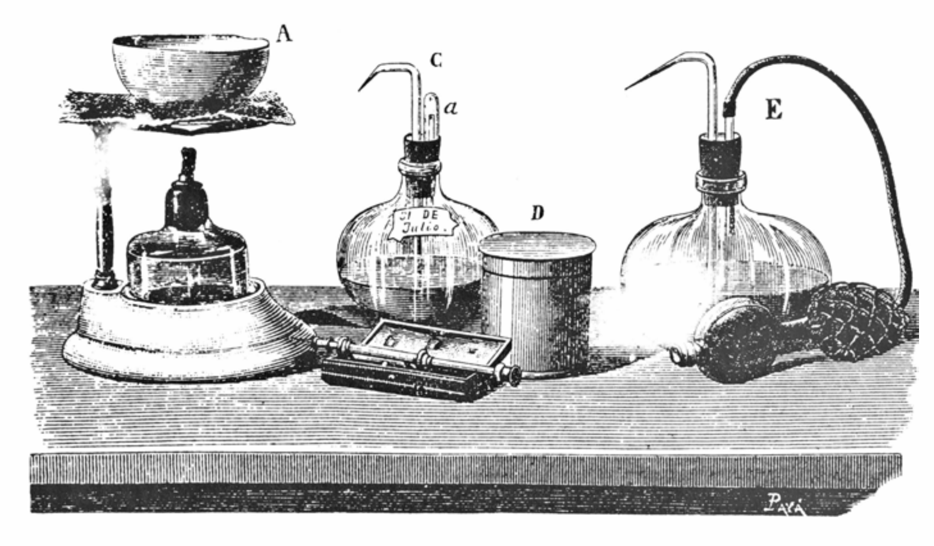
aprobación explícita de Pasteur, y cómo a partir de entonces se refugió en el "Instituto Ferrán", su laboratorio privado. Nunca llegó a integrarse en el mundo científico académico ni a asumir sus normas de conducta. Ello influyó de modo decisivo en el conjunto de su obra y, en concreto, en su comportamiento en torno a la vacuna anticolérica y la polémica que ocasionó. Esta es la clave de sus relaciones siempre difíciles con los representantes de la medicina universitaria y las instituciones oficiales, así como de la forma en la que presentó y defendió su hipótesis acerca del ciclo biológico del vibrión colérico, principal obstáculo para su prestigio científico en 1885.

En principio, resulta explicable que Ferrán intentara seguir el mismo planteamiento que había conducido a Koch a descubrir el papel de las esporas en la etiología del carbunco e incluso que relacionara el vibrión colérico con las *Peronosporaceae*, entonces en primer plano en el ambiente micrográfico. Menos razonable fue proponer el barroco ciclo de la *Peronospora barcelonae*, que partía de filamentos espirales y esporas para llegar a "cuerpos muriformes" y "oosferas", aunque puede entenderse como la hipótesis imaginativa de un científico joven y ambicioso. El momento en el que Ferrán chocó frontalmente con los patrones de comportamiento propios de la comunidad científica fue, no obstante, cuando no supo encajar la crítica de su hipótesis que, en mayo de 1885, le hizo el propio Koch, poniendo de relieve que se basaba en una interpretación errónea de formas involutivas, en la línea que luego siguieron otros investigadores, entre ellos Cajal, amigo suyo en aquel momento. La actitud cerrada y pertinaz de Ferrán al ver falsada su teoría contrasta precisamente con la discreción y premura con que Cajal retiró aquel mismo año de la circulación otra hipótesis del mismo género, fruto igualmente del entusiasmo imaginativo de un investigador novel: una supuesta disposición en forma de "un hilo estriado que cose las células impidiendo su retracción", que le había ilusionado tanto que había incluido un dibujo esquemático de la misma en la portada del primer fascículo de su *Manual de Histología*.

El grupo que en 1885 encabezaba Amalio Gimeno y la labor que había realizado en torno a la microbiología correspondían plenamente, por el contrario, al mundo universitario. Desde su incorporación en 1877 a la Facultad de Medicina de Valencia, como catedrático de terapéutica, Gimeno se había convertido en una de las personalidades más destacadas de un claustro mayoritariamente seguidor de la nueva "medicina de laboratorio", es decir, de la ciencia y la práctica médicas fundamentadas en la investigación experimental. En sus *Lecciones* (1876) y en su *Tratado* (1886) de patología general ofreció una síntesis de esta disciplina explícitamente fundamentada en la obra de Claude Bernard, pero su principal contribución fue introducir la farmacología experimental a través de un excelente *Tratado de terapéutica* (1877-1880) y de varios trabajos monográficos. Promovió también la traducción de textos extranjeros de la nueva orientación, esfuerzo que culminó con la versión castellana de una obra tan significativa como el *Diccionario de medicina*, de Emile Littré y Charles Robin (1889).

Resulta lógico que Gimeno fuera muy receptivo a los avances de la naciente microbiología médica y que se convirtiera en la figura dirigente de un grupo de profesores de la Facultad seriamente interesados por la misma, entre ellos, Manuel Candela Pla, catedrático de obstetricia y ginecología, Pascual Garín Salvador, entonces profesor ayudante y más tarde catedrático de cirugía, y Vicente Navarro Gil, otro profesor ayudante. Su actitud se refleja en la frase final de un discurso de Candela acerca de la fiebre puerperal (1885): "Paso a la ciencia moderna. Paso a la naciente microbiología. Paso a la etiología del porvenir." En el tema concreto del cólera, a este grupo se debió la asimilación del descubrimiento del vibrión colérico por Koch (1883), la publicación en el verano de 1884 de la traducción comentada de un texto del gran bacteriólogo alemán sobre el tema, así como la observación y posterior cultivo de vibriones en las deposiciones de enfermos del brote de la localidad de Beniopa, en el otoño de dicho año, antecedente inmediato de la gran epidemia de 1885. Al mismo grupo se asociaron, además, Pablo Colvée Roura y Vicente Peset Cervera, discípulos de José Montserrat y Riutort, catedrático de química y rector de la Universidad, que habían sido los principales adelantados de los estudios microbiológicos en Valencia. Formados en la Facultad de Ciencias, aunque luego cursaron también medicina, Colvée y Peset venían publicando desde mediados de los años setenta artículos y libros destinados a informar con rigor de las novedades bacteriológicas y realizando trabajos de laboratorio con los que verificaron las investigaciones extranjeras y consiguieron algunos hallazgos originales. Su incorporación acentuó el carácter académico del grupo, ya que ambos aportaron una perspectiva puramente científica.

El grupo encabezado por Gimeno fue el promotor de la vacunación anticolérica de Ferrán, en la que colaboró de forma decisiva. El 31 de diciembre de 1884, un trimestre antes del inicio de la gran epidemia, Gimeno, Colvée y Garín visitaron a Ferrán en Tortosa y

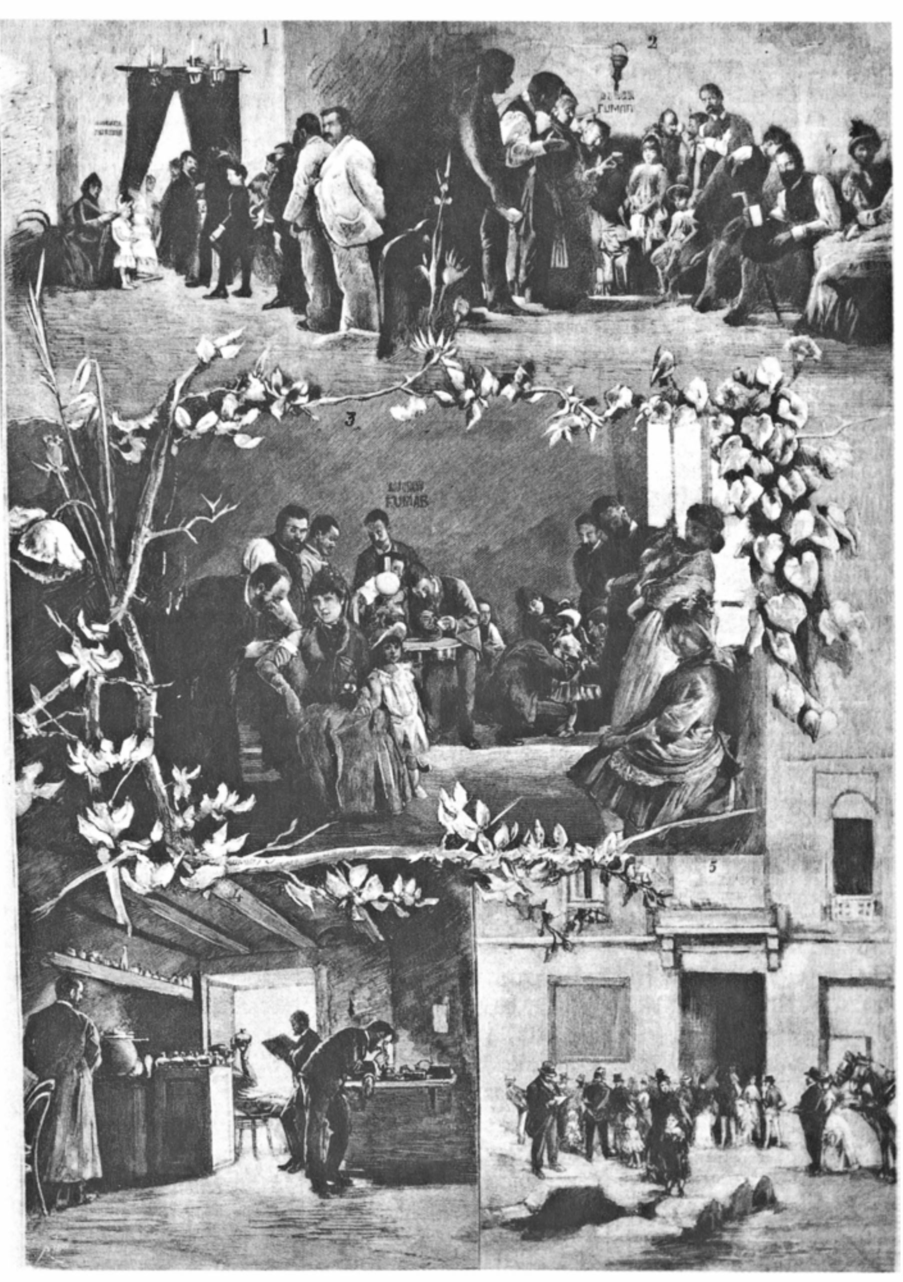


A. Soporte, lámpara y evaporadera donde se hierve el agua para esterilizar la jeringuilla.—B. Jeringuilla para la inoculación.—C. Matraz Ferrán con vacuna: el tubo corto está cubierto por una pequeña campana de cristal *a*.—D. Tarro de porcelana con tapadera para contener la vacuna y desde donde se la toma aspirando con la jeringuilla.—E. Matraz dispuesto para extravasar la vacuna.

2. Grabado del libro de Ferrán, Gimeno y Paulí en el que aparece el instrumental que utilizaron para la vacunación anticolérica.

quedaron tan convencidos que se vacunaron. El comienzo de la epidemia en Játiva fue diagnosticado bacteriológicamente por Gimeno y Candela, que habían sido comisionados oficialmente, en colaboración con Ferrán, quien poco después montó su laboratorio en Valencia en una casa propiedad de Candela. Sus más importantes colaboradores en la vacunación, además de Paulí y el propio Candela, fueron Garín, Navarro, Colvée y Peset Cervera. Gimeno desempeñó, además, el papel de principal defensor de la vacuna en los ambientes académicos, especialmente en la misma Valencia y en Madrid.

La polémica acerca de la vacunación Ferrán se inició en Valencia, pero se extendió casi inmediatamente al resto de España y a la comunidad científica internacional. Los factores que la condicionaron fueron muy complejos. En primer lugar, se produjo en torno suyo una polarización ideológica paralela a la ocasionada por teorías científicas como el darwinismo o innovaciones técnicas como el submarino Peral: en principio, "ferranista" fue sinónimo de liberal o progresista, y "antiferranista" de conservador o inmovilista. Esta polarización se imbricó de forma no siempre sencilla con la actitud de los médicos y científicos del momento ante la teoría microbiana de la infección. Los que no la admitían militaron, por supuesto, entre los adversarios de la vacunación, como sucedió, por sólo citar un ejemplo destacado, con la comisión de la Royal Society y la Universidad de Cambridge, que no aceptaba que el vibrión colérico fuese el agente causal del cólera. Un tercer factor que enmarañó todavía más el problema fue la mentalidad propia del imperialismo científico, que alcanzó su culminación en el informe de la comisión francesa presidida por el médicolegista Paul Brouardel, que se limitó a manifestar sus prejuicios sin molestarse en reunir una mínima información.



3. *"Las inoculaciones anticoléricas del Dr. Ferrán". Grabado de* La Ilustración Española y Americana, *1885: "1. Sala de inscripción; 2. Sala de preparación; 3. Sala de inoculación; 4. Laboratorio microbiológico del Dr. Ferrán; 5. Exterior de la casa donde está localizado el laboratorio, en la calle Pascual y Genís".*

La auténtica crítica científica de los planteamientos de Ferrán tuvo que enfrentarse con todos estos factores tanto como con la adhesión entusiasta que las aportaciones del microbiólogo de Tortosa habían despertado, no sólo en España, sino en Francia, Gran Bretaña, Alemania y otros países europeos. Dicha tarea puede ejemplificarse en los informes españoles de Santiago Ramón y Cajal y Eduardo García Solá y en los análisis objetivos y rigurosos del francés Jean B. A. Chauveau y el norteamericano Edward O. Shakespeare. Un aspecto central de todos ellos fue desmentir el ciclo biológico de la supuesta *Peronospora barcelonae*, en la línea abierta por el propio Koch. También insistieron todos en la necesidad de estadísticas rigurosas y amplias para verificar el valor profiláctico de la vacuna, otra de las limitaciones indudables de Ferrán y sus colaboradores. Sin embargo, conviene recordar que los primeros controles estadísticos realmente válidos de la vacunación anticolérica no fueron realizados hasta mediados del presente siglo y que, por otra parte, George H. Bornside ha demostrado recientemente la eficacia de la vacunación Ferrán de 1885 mediante un análisis *post hoc* de los datos estadísticos de la época.

A comienzos del presente siglo, superados en gran parte los factores condicionantes de la polémica, la comunidad científica internacional reconoció que la vacunación anticolérica de 1885 había sido un importante hito en la historia de la salud pública. La Academia de Ciencias de París concedió a Ferrán el premio Bréant en 1907 y los más destacados especialistas en bacteriología e inmunología, comenzando por máximas figuras como Pierre Roux y Paul Ehrlich, lo consideraron como el primero que había demostrado "la acción patógena del vibrión colérico en los animales y que éstos pueden ser in-

munizados"; le atribuyeron la iniciativa de "la inmunización preventiva del hombre contra el cólera" y lo calificaron como "el científico que ha conseguido en primer lugar la inmunidad efectiva del hombre por bacterias".

Sin embargo, la figura de Ferrán no consiguió después en los estudios historicomédicos el relieve que merecen sus aportaciones en torno al cólera y las que realizó después sobre otras cuestiones bacteriológicas. A ello contribuyó la posición marginal de nuestro país en la actividad científica contemporánea y también la ausencia durante largo tiempo de análisis históricos rigurosos de la obra del microbiólogo catalán, presa habitual de enfoques panegíricos o de prejuicios infundados en contra suya. La situación está cambiando en la actualidad gracias a la atención que la investigación historicomédica viene dedicando al tema, que quizá experimente un notable incremento con motivo del centenario que ahora celebramos.

La inoculación preventiva contra el cólera morbo asiático, impresa originalmente en la misma Valencia en 1886, al año siguiente de la vacunación, tuvo después dos reediciones. La primera se publicó en 1893, traducida al francés por el médico Emile Duhourcau, uno de los más destacados "ferranistas" de la patria de Pasteur. La segunda apareció en 1912 en castellano y con algunos cambios y adiciones motivados principalmente por el reconocimiento internacional que habían alcanzado ya las aportaciones de Ferrán.

La acusación de que Ferrán quiso mantener la naturaleza de su vacuna en secreto fue uno de los principales ataques que recibió en 1885 por parte de sus adversarios poco rigurosos. Como es uno de los prejuicios en contra suya que se ha venido manteniendo después hasta la actualidad, resulta de interés reproducir algunas líneas del capítulo que este libro dedicó a la cuestión: "Los que preguntaban en los primeros tiempos de la práctica de nuestras inoculaciones cuál era esta vacuna y pretendían ver en ella un secreto daban muestras de gran ligereza, puesto que si hubieran querido tomarse el trabajo de *leer bien*, no ya la *Nota* presentada por nosotros en 31 de marzo a la Academia de Ciencias de París y publicada en los *Comptes rendus* de esta respetable corporación, sino el informe de la Real Academia de Medicina de Barcelona (11 marzo 1885), que publicaron íntegro o en extracto casi todos los periódicos científicos y profesionales del país y extranjeros y hasta algunos políticos de más circulación; si hubieran querido enterarse, repetimos, hubieran sabido bien pronto en qué consistía el famoso *secreto* de nuestra vacuna...

"Cualquier bacteriólogo, por poco experimentado que fuera, tenía datos de sobra para hacer cultivos de vacuna contra el cólera: todos los médicos también, por escasos que fueran sus conocimientos en la materia, podían entender en qué consistía el líquido que nos servía para inocular, y que no era

más que *el cultivo en caldo de una gota de magma tomada de una colonia de vírgulas en placa de gelatina, cuyo cultivo se mantenía en la estufa a 37° hasta que el líquido se enturbiara al máximum*.

”Resulta de esto que cuando la práctica de las inoculaciones empezó a hacerse pública a últimos de abril, *nadie tenía derecho a decir que nos habíamos reservado el secreto de la vacuna del cólera*. ¡Y qué de inconcebibles injurias se nos dirigieron a este injusto propósito en España y en el extranjero!

”Resultado de ellas fue la comunicación que remitimos en el mes de julio a la Academia de Ciencias de París como *Ampliación* a la *Nota* primera, en la que hacíamos ver que desde el 31 de marzo no habíamos tenido ninguna reserva sobre la naturaleza de nuestro líquido de inoculación.

”Nosotros hemos usado siempre como vacuna del cólera los cultivos puros del microbio colerígeno en caldo, sin contener más que vírgulas y espirilos. Se favorece la vegetación, una vez sembrado el caldo, por medio de la incubación en la estufa a 37° durante el tiempo necesario para que se enturbie el líquido sembrado. Todos los demás detalles los hemos consignado en la obra en que hablamos del cultivo del vírgula.

”La virulencia del cultivo depende de varias causas: de lo nutritivo del caldo (v. gr. caldo con gelatina), de la densidad del cultivo y de la procedencia de la semilla. El cultivo más atenuado es el de caldo menos nutritivo, el menos denso y el sembrado con semilla tomada de otro caldo y no de gelatina. Las condiciones contrarias pueden dar el máximum de virulencia. Cualquiera que sea, sin embargo, el grado de ésta en los cultivos, conviene hacer constar que el hombre los tolera perfectamente a la dosis variable, según el caso, de 2 a 4 cc. y aún más algunas veces.

”Lo que consignamos en este párrafo anterior explicará a nuestros lectores por qué en nuestras notas hemos hablado de *cultivos atenuados* y de *cultivos sin atenuar*.”

AVISO AL LECTOR

En la administración de la revista está a disposición de quien la solicite una nueva versión del artículo de Walter Tape “La topología de los espejismos”, aparecido en el mes de agosto de 1985.

Movimiento caótico

Los sistemas dinámicos deterministas, cuyo ámbito de aplicación cubre todas las ramas de la ciencia, tienen movimientos de tal complejidad que resulta imposible toda predicción, por cuya razón reciben el nombre de caóticos

Antonio F. Rañada

Uno de los resultados más sorprendentes de la física de los últimos años es la comprobación y el entendimiento de que, en contra de la idea que se tiene de la ciencia como descripción de la regularidad de la naturaleza, la mayoría de los sistemas dinámicos deterministas tienen movimientos tan complejos, con sus trayectorias entrecruzándose de forma tan errática y turbulenta, que resulta imposible toda predicción detallada para tiempos grandes y extremadamente difícil su estudio. En esos casos se habla de caos, de comportamiento caótico, turbulento o estocástico.

Constituye su característica más importante la extremada sensibilidad de los movimientos a pequeñas variaciones en las posiciones iniciales, que son imposibles de eliminar, bien como resultado de inevitables imprecisiones en las medidas, bien debidas a necesarias aproximaciones en los métodos de cálculo. Significa esto que dos trayectorias posibles que en el instante inicial están muy próximas pueden separarse de forma brusca y violenta al cabo de un tiempo, sin ninguna intervención exterior, por lo que una pequeña imprecisión en el dato inicial hace que podamos confundir una con la otra, lo que equivale a un error grande e, incluso, a un desconocimiento completo del estado final. Desde hace miles de años se utiliza esta característica de algunos sistemas en los juegos de azar (dados, monedas, ruletas) o para fines mágicos o adivinatorios (cartomancia). En esos casos, aunque se pueden hacer predicciones válidas si el tiempo es corto, se hacen muy difíciles cuando éste aumenta, hasta resultar imposibles con el crecimiento incontrolable del error.

Se sabía que esa estocasticidad o aleatoriedad aparece en sistemas con un número grande de grados de libertad. (Por grado de libertad se entiende cada una de las variables necesarias para la descripción de un sistema.) Pero resulta notable y nueva la constatación de que eso ocurre con una enorme generalidad, insospechada hasta hace poco, incluso en sistemas de aspecto muy simple con sólo dos o pocos más grados. Aunque Henri Poincaré y Albert Einstein lanzaron llamadas de atención sobre el problema, su preocupación no llegó a calar hasta los últimos años. Se tiene ahora la conciencia de que sus importantes consecuencias no sólo afectan a la física, la astronomía, la biología y otras ciencias afines, sino que incluso obligan a replantear aspectos básicos de la teoría de la ciencia. El descubrimiento de la ubicuidad del caos es, sin duda, la tercera gran revolución de la física del siglo XX, junto con las de la relatividad y la teoría cuántica, y sus consecuencias son, en opinión de muchos, de trascendencia comparable a las de éstas.

Todo esto puede causar sorpresa en una sociedad construida sobre la capacidad de la ciencia de predecir acertadamente el comportamiento del mundo material, pues el hombre hace constantemente predicciones que resultan correctas. La paradoja se explica porque uno de los criterios para la selección de los problemas a estudiar es el de simplicidad, lo que hace que los científicos hayan escogido, para empezar su aproximación al mundo físico, una primera clase de problemas fácilmente resolubles en los que la evolución temporal sigue pautas sencillas.

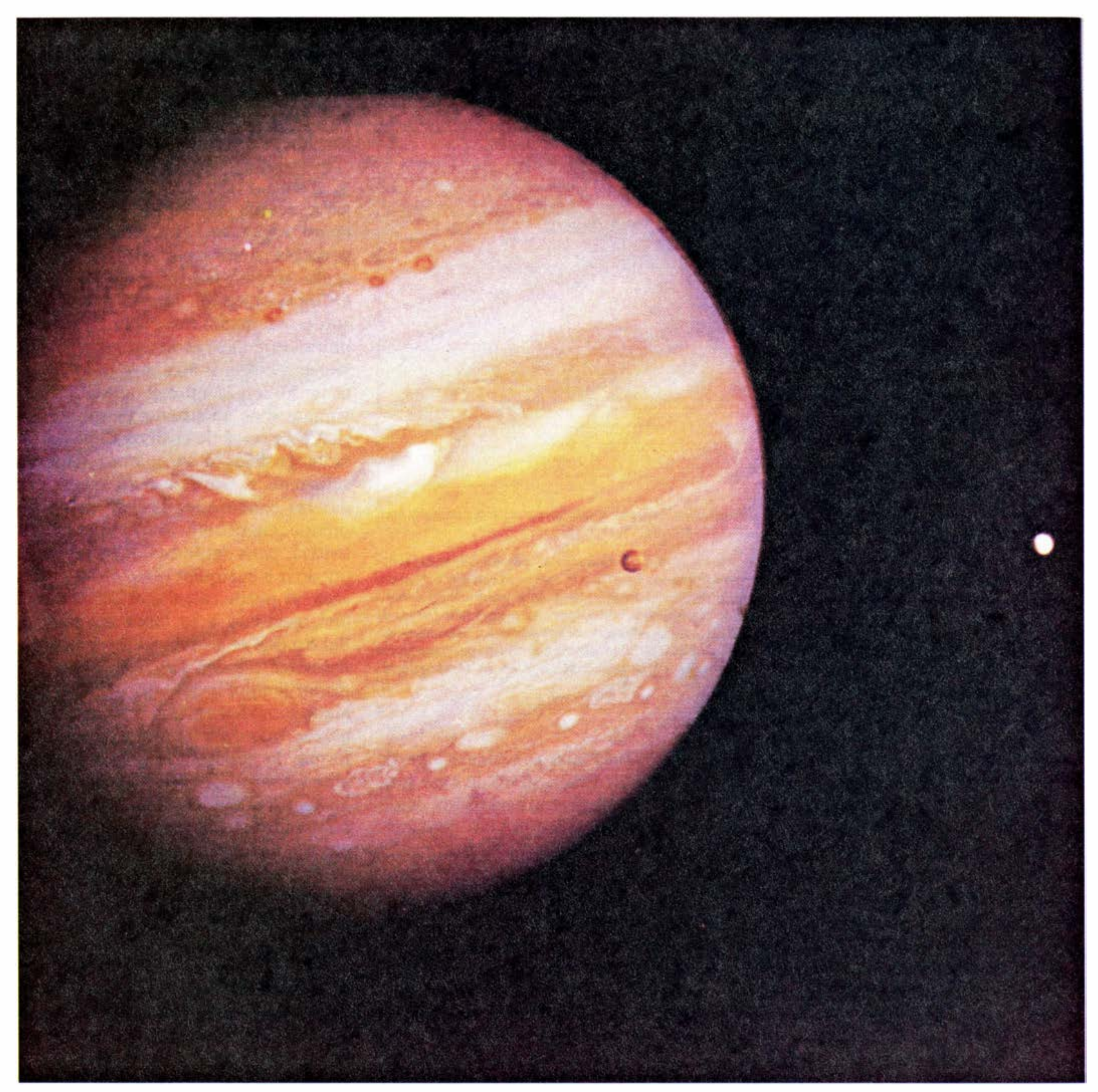
Conviene que el lector se familiarice con algunas nociones básicas que iremos manejando a lo largo del trabajo. Llamaremos coordenadas al conjunto de variables necesarias para la descripción geométrica de un sistema. En la mayoría de los casos son distancias o ángulos. Sus derivadas con respecto al tiempo son las velocidades. Para la descripción dinámica de un sistema se necesitan las coordenadas y las velocidades. A veces, si no siempre, convendrá echar mano de los momentos, que son funciones de las velocidades. En el caso de una partícula que tengamos que determinar mediante coordenadas cartesianas, los momentos equivalen al producto de la masa por las componentes de la velocidad.

Ya aludido, utilizaremos bastante el concepto de número de grados de libertad. Trátase del número de coordenadas independientes, o también de momentos. La partícula que imaginemos ubicada en el plano, que sabemos posee dos dimensiones, tendrá dos grados de libertad; tres en el espacio tridimensional; n partículas en el espacio tendrán $3n$ grados. De acuerdo con ello, el estado de un sistema es la especificación del conjunto de los valores de las n coordenadas y los n momentos en un cierto tiempo. Y con el estado de un sistema se relaciona el espacio de las fases, que se define por el espacio de $2n$ coordenadas, cuyos puntos corresponden a los estados de un sistema. El punto representativo de un sistema describe una órbita o trayectoria al variar el tiempo (avanzar o retroceder).

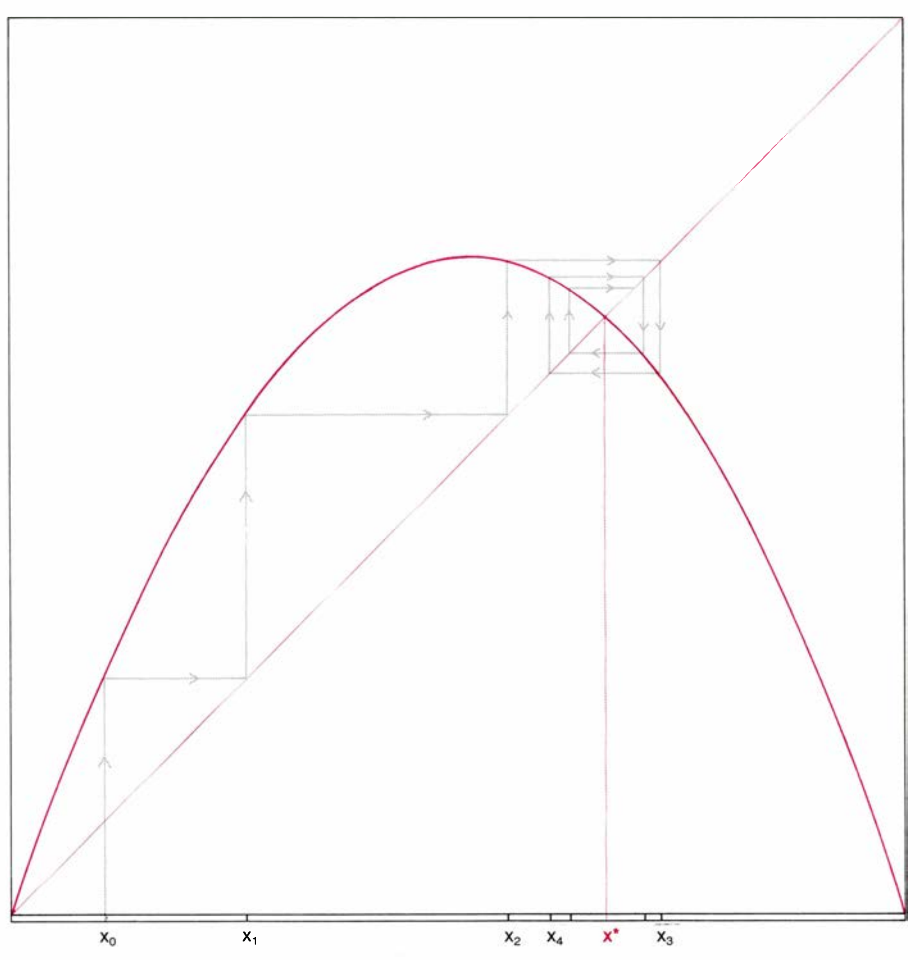
Por razones de brevedad y sencillez, nos limitaremos en esta exposición a sistemas clásicos, es decir, a aquellos en que no intervienen los efectos de la física cuántica. Y conviene, en primer lugar, explicar por qué los éxitos de la ciencia han podido llevar a la idea de que las cosas evolucionan de manera necesaria hacia un resultado previsible. La mecánica, parte de la física y las matemáticas que trata de la descripción del movimiento, lo hace mediante ecuaciones diferenciales, que son relaciones que permiten calcular las aceleraciones en función de las posiciones y las velocidades. Cada una de esas ecuaciones tiene infinitas soluciones que corresponden a los infinitos movimientos que podría seguir el objeto estudiado. Pero sólo hay una que corresponda al estado en el momento actual. (Estado

de un sistema significa aquí el dato de todas las posiciones y velocidades.) Por ello, conocida la ley, una vez dado el estado actual, queda fijada la solución, es decir, el movimiento, para todos los valores del tiempo. En otras palabras, tanto el futuro como el pasado quedan determinados por el presente. Esta importante propiedad de la teoría clásica recibió el nombre de determinismo.

Sistemas deterministas son así todos los que obedecen las leyes de la física clásica u otras construidas según el mismo principio, como se hace a veces en otras ciencias como la química, la biología y la economía y se intenta hacer en sociología, por ejemplo. Determinismo se identifica, por ello, con predictividad, es decir, con la capacidad de predecir el futuro (o de postdecir el pasado) a partir únicamente de



1. ORDEN Y CAOS. Júpiter, con sus lunas y sus ciclones de diversos tamaños, ilustra expresivamente la dualidad orden-caos que se manifiesta, de manera permanente y ubicua, en la naturaleza. Io y Europa, dos de los cuatro satélites descubiertos por Galileo en 1610, giran en torno al gran astro siguiendo órbitas estables y regulares que cumplen las leyes de Kepler. En cambio, en la turbulenta superficie del planeta, el caos se manifiesta en una impresionante variedad de vórtices de distintos tamaños, tanto más impredecibles cuanto más pequeños. El mayor de ellos, la Gran Mancha Roja, descubierta por R. Hooke en 1664, es un enorme anticiclón en el que cabría la tierra entera y se mueve lentamente desde hace más de 300 años, de forma no violenta aunque impredecible en sus detalles. Otros torbellinos menores tienen escalas de tiempo de varios decenios, períodos en que pueden predecirse aproximadamente sus movimientos. Tal es el caso del óvalo blanco que se distingue claramente al sur de la Gran Mancha Roja, aparecido inesperadamente en 1938 y del que no se puede saber cuánto durará. La escala de la turbulencia continúa con remolinos menores de movimientos más erráticos y vida más corta, tan sólo de años o meses, hasta llegar a pequeños pero vertiginosos tornados que se forman y se destruyen en una agitación incesante, a la que sólo se puede aplicar métodos estadísticos. El mismo fenómeno se da en la atmósfera terrestre, aunque con menor diversidad en las escalas, desde los grandes ciclones y borrascas cuyas vidas pueden durar varias semanas, hasta los muy pequeños turbiones y trombas que se crean y desaparecen en momentos, pasando por los huracanes y tifones. No obstante lo anterior, debe subrayarse que no se puede excluir la posibilidad de que Io y Europa entren en movimiento caótico debido a perturbaciones de otros cuerpos celestes.



2. SISTEMA DINAMICO DISCRETO que exhibe con claridad cómo aparecen propiedades complejas detrás de operaciones matemáticas muy sencillas. Representamos la función $y = bx(1 - x)$ con $b = 2{,}9$ (*negro continuo*). Dado un valor x_0 se traza una línea vertical de abscisa x_0 hasta $f(x)$, seguida de una horizontal hasta la bisectriz $y = x$; la nueva abscisa será x_1. Reiterando el proceso se obtiene una línea quebrada (*negro de trazos*), cuyos segmentos verticales tienen abscisas $x_2, x_3, \ldots$, que tienden a x^*, determinada por la intersección de $f(x)$ con la bisectriz $y = x$ (*azul*). Este sistema podría formalizar el de la vida real constituido por una especie biológica en un territorio: x_t sería entonces la población en la generación t y x^* su nivel natural.

los datos actuales. El sistema solar ofrece abundantes muestras, pues sus astros están siempre en las posiciones predichas anteriormente, como atestigua en estos momentos el paso del cometa Halley. Otro ejemplo, particularmente expresivo, es el del llamado eclipse de Herodoto. Nos cuenta este historiador griego que, cuando los lidios y los medos se enfrentaban en una batalla, "el día se transformó en noche súbitamente". El eclipse, que había sido predicho por Tales de Mileto, produjo tal impresión a los contendientes que cesaron inmediatamente el combate y acordaron la paz. Pero Herodoto no da la fecha de la batalla, de la que no hay ningún otro dato histórico. Sin embargo, sabemos hoy que tuvo lugar el 28 de mayo del año 584 a.C., por la tarde. Para ello basta con resolver las ecuaciones del sistema solar, a partir de su estado actual, lo que permite asegurar que esa fue la fecha del eclipse.

Esta capacidad predictiva, de la que se empezó a tomar conciencia a partir de Newton y Euler, sirvió de base conceptual a una doctrina conocida como mecanicismo, que influyó notablemente en el pensamiento posterior. El francés Pierre Simon de Laplace la formuló en su forma más radical en 1814 en su obra "Ensayo filosófico sobre las probabilidades" en la que afirma, en una famosa frase, que para "una inteligencia que conociera en un instante dado todas las fuerzas de la naturaleza y la situación de los seres que la componen y fuera suficientemente poderosa para someter esos datos al análisis matemático... nada sería incierto y el futuro y el pasado estarían presentes ante sus ojos". Está claro que para Laplace y el pensamiento mecanicista no hay azar: todo está determinado y todo es predecible. Este punto de vista alcanzó una enorme influencia y fue aplicado abundantemente, por ejemplo, para negar la libertad humana como incompatible con la física y la química.

Pero el estudio de sistemas complejos con muchos grados de libertad, como es el caso de un litro de aire que tiene unas 10^{25} moléculas (10 billones de billones) propició el nacimiento de otra tradición. Pues, al resultar inaplicables los métodos deterministas por la imposibilidad de manejar simultáneamente todos los datos, hubo que recurrir a leyes probabilistas y al uso de valores medios, de la misma manera que, al estudiar la riqueza de un país, se usa el concepto de renta per cápita. En ese caso, no hay determinismo: sólo se pueden predecir probabilidades.

Mientras que el mecanicismo consideraba todos los movimientos como regulares, el probabilismo los concebía desordenados, tras la aparente simplicidad de algunos casos. Quizá la expresión más clara de ese desorden se manifiesta en la famosa hipótesis ergódica, propuesta por el físico vienés Ludwig Boltzmann en 1871. De acuerdo con la misma, todos los movimientos de un sistema pasan arbitrariamente cerca de cualquiera de sus estados posibles si se espera un tiempo suficiente. Como esto ocurriría para todas las condiciones iniciales, se comprende que debería perderse la predictividad, pues desde cualquier estado se puede ir a cualquier otro. Pero, en ese caso, se puede calcular el promedio de una magnitud a lo largo del tiempo. Puesto que en la evolución se pasa por todos los estados posibles, dicho promedio temporal debe ser igual al evaluado sobre los estados posibles, que es mucho más fácil de calcular. De esta forma, la hipótesis ergódica permite obtener los promedios y se puede fundamentar la mecánica estadística. Este punto de vista enfrenta a la frase de Laplace antes citada otra, no menos famosa, debida al escocés James Clerk Maxwell: "La lógica verdadera de este mundo está en el cálculo de probabilidades".

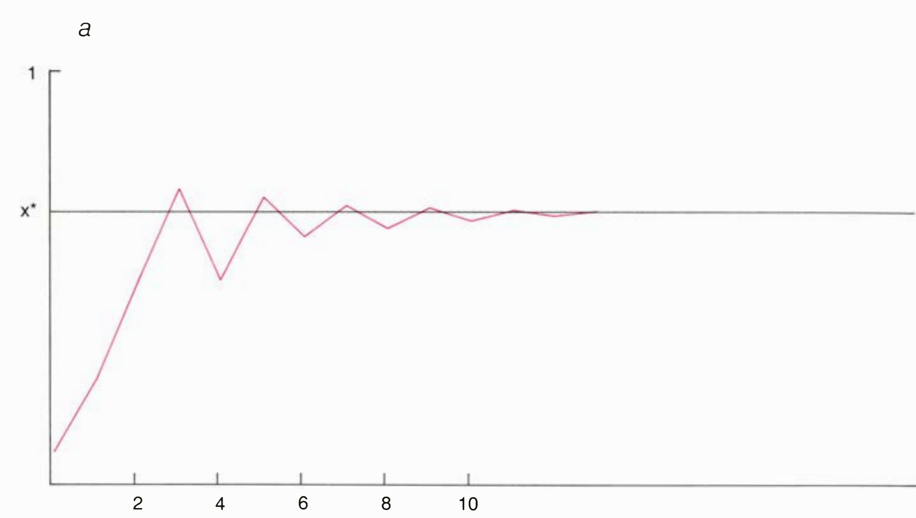
La oposición entre esas dos tradiciones –mecanicismo y probabilismo– tenía antiguas raíces históricas. Pues Demócrito, creador junto con Leucipo de la teoría atomista, decía ya hacia el año 400 a.C.: "todo se debe al azar y a la necesidad"; intentando conciliar así el devenir y el ser, base de las concepciones antagónicas de Heráclito y Parménides respectivamente. El que el bioquímico francés J. Monod eligiese precisamente esa frase para titular su influyente libro "El azar y la necesidad", en el que trata de fundamentar la biología moderna, relacionando la necesidad con la estabilidad de las especies

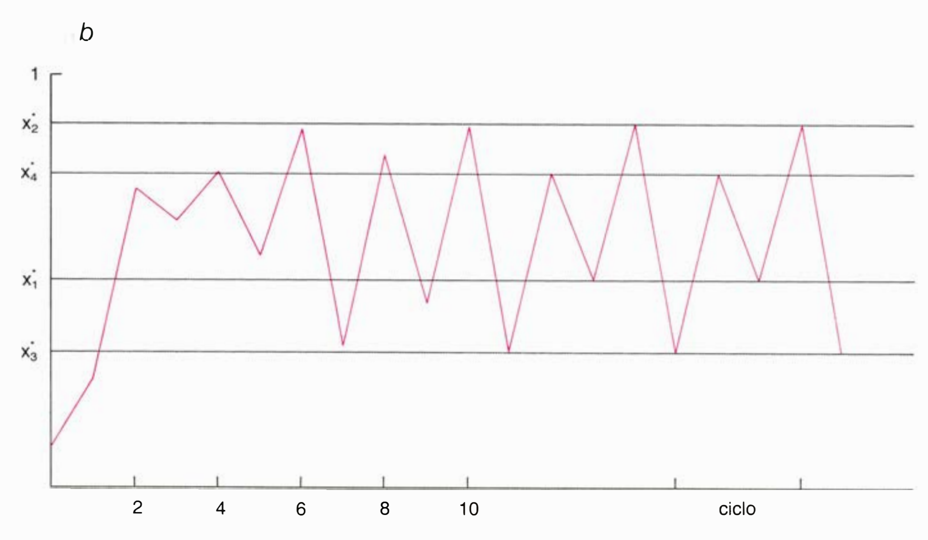
y el azar con las mutaciones, muestra bien a las claras la importancia de esa dualidad.

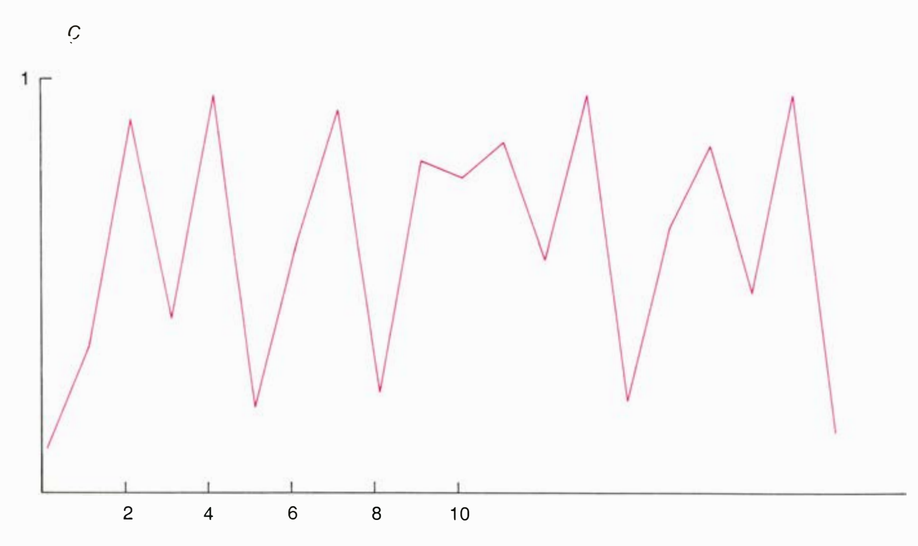
El determinismo y el probabilismo podían convivir, pues parecían tener sus respectivos campos de aplicación. Los sistemas con pocos grados de libertad, como un planeta, quedaban en la esfera de lo determinista; los que tenían muchos, como el litro de aire, en el ámbito de las probabilidades. Se sabía, además, que algunos poseían, a la vez, movimientos regulares y caóticos, dependiendo de los datos iniciales o de alguna magnitud característica como una velocidad o la energía. Tal es el caso de los fluidos, que pueden moverse en régimen laminar o turbulento. Pero siempre se tendía a asociar la impredecibilidad con un alto número de grados de libertad. Por ello lo complejo era una categoría cuantitativa, mera acumulación de elementos simples.

Pero la estructura conceptual de esa dualidad era incorrecta, lo que suponía una constante fuente de incomodidad y ambivalencia, situación que se agravó cuando se llegó a comprender, a finales del siglo XIX, gracias sobre todo a Poincaré, que un sistema que debería ser simple, el de los tres cuerpos, ofrecía también comportamiento caótico impredecible. Ante ese grave problema, se adoptó la táctica de ignorarlo, lo que enredó la confusión reinante. Sin decirlo claramente, se presentaba el sistema de los tres cuerpos como si fuera una patología, cuando es más representativo de la dinámica genérica que el péndulo o el oscilador, ejemplos con que se suelen ilustrar las teorías.

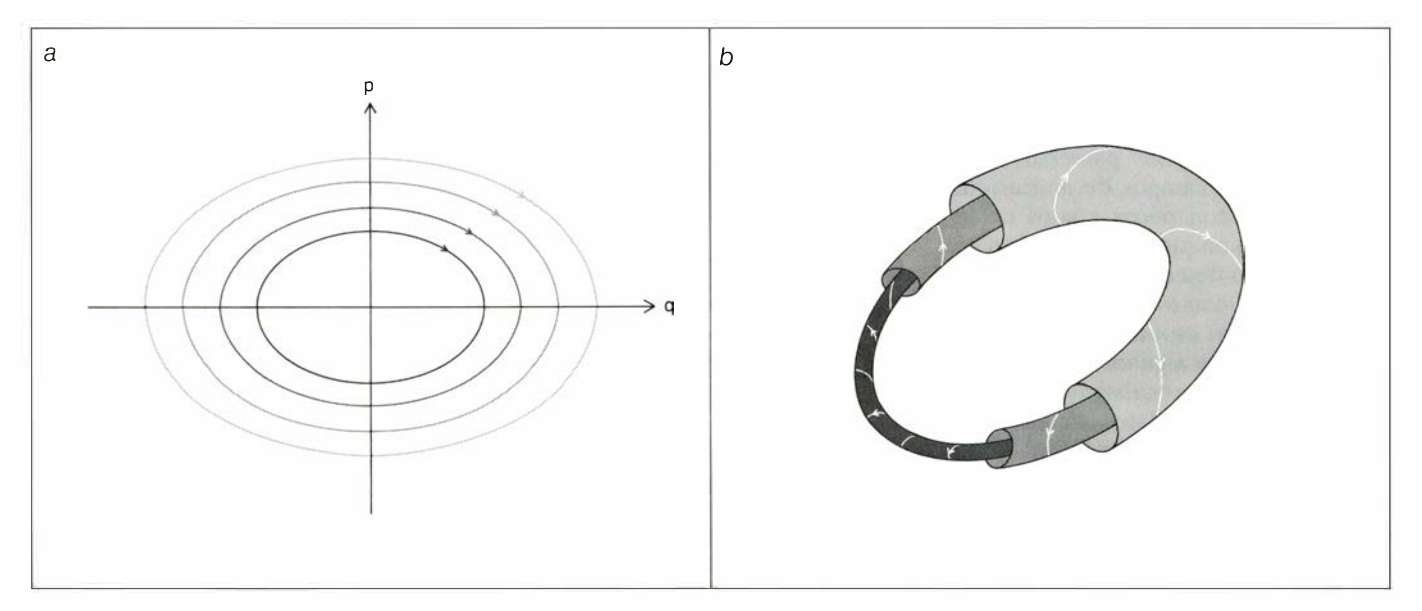
Ambas tradiciones tienen su parte de razón y no son incompatibles. Se ha llegado a entender cómo el determinismo de las ecuaciones básicas no garantiza la predictividad en la práctica. Para ello es necesario, además, que al variar ligeramente los datos iniciales no cambie mucho la trayectoria, y así nuestros inevitables errores no se agranden al pasar el tiempo. Se ha podido demostrar que los sistemas dinámicos tienen, en general y simultáneamente, movimientos regulares y caóticos entrelazados, con datos iniciales arbitrariamente próximos. Esto ocurre ya en sistemas aislados con sólo dos grados de libertad, e incluso con uno solo si está sometido a una fuerza exterior dependiente del tiempo. Muchos se sorprenderán si decimos que el péndulo, frecuente representación de lo regular, se puede comportar de modo caótico si se le somete a una fuerza que varíe periódicamente con el tiempo.







3. LLAMASE ATRACTOR a la solución donde todas las trayectorias convergen. Se esquematizan tres situaciones de la sucesión x_t. En el caso superior, $b = 2,9$, tenemos un atractor simple, con $x^* = 0,655$. En el centro $b = 3,5$ (atractor de período 4; $x^*_1 = 0,501$; $x^*_2 = 0,875$; $x^*_3 = 0,383$; $x^*_4 = 0,827$). Los tres casos se observan en la naturaleza. En el esquema inferior, $b = 3,8$ (sucesión caótica sin pauta regular). Ejemplos pertinentes de los tres esquemas serían: una especie biológica cuya población en un territorio (una clase de pájaros en un valle, una bacteria que infecta a un humano) tiende a su nivel natural, otra en la que la población varía periódicamente en ciclos de 4 años, con años de abundancia, como cuando $x=x^*_2$, y otros de escasez, cuando $x=x^*_3$, y, finalmente, otra en la que el número de individuos cambia erráticamente, sin pauta regular.



4. ESPACIO DE LAS FASES DE UN OSCILADOR ARMONICO (*a*): es un plano cuyas coordenadas son *q* (posición) y *p* (masa por velocidad). El punto representativo del estado del sistema se mueve describiendo elipses cerradas, en un movimiento periódico regular y ordenado. En el caso de un sistema integrable de *n* grados de libertad, las órbitas se ordenan en toros de *n* dimensiones, con *n* frecuencias distintas. En (*b*) aparecen representados varios toros de un sistema con $n = 2$, cuyas órbitas se pueden expresar como suma de dos funciones periódicas ya que en cada toro hay dos caminos irreducibles. Ejemplo de la ilustración de la izquierda serían las oscilaciones pequeñas del péndulo de un reloj, siendo *q* el ángulo que forma con la vertical, y de la ilustración de la derecha el movimiento de un planeta en su órbita, despreciando las fuerzas debidas a los demás, con coordenadas *r* (distancia al Sol) y ϕ (ángulo en el plano de la órbita).

Por ello, lo complejo es una categoría cualitativamente distinta de lo simple que no se debe sólo a una acumulación de elementos. Pero como el comportamiento simple y el complejo coexisten en íntima unión en la generalidad de los sistemas físicos, más que antagónicos resultan complementarios. Más aún, la diferencia entre orden y caos depende de la limitación de nuestra capacidad en la medida del mundo. Si pudiésemos determinar con precisión infinita los datos iniciales, muchos movimientos serían a la vez predecibles y caóticos.

Los sistemas dinámicos deterministas clásicos se agrupan en dos clases: discretos y continuos. Los sistemas discretos son aquellos en los que una o varias variables toman valores en momentos discretos del tiempo; lo designaremos por la letra t y puede valer 0, 1,2... Sus valores en cada momento están determinados por los del anterior. Por ejemplo, si existe una sola variable x, se tiene $x_{t+1} = f(x_t)$, donde $f(x)$ es una función conocida. A partir de un dato inicial x_0, al que llamaremos semilla, se obtiene así una sucesión: x_0, milla, se obtiene así una sucesión: x_0, dato inicial x_0, al que llamaremos se- x puede representar la población de una especie en el año t-simo, que depende de la del año anterior y de factores ambientales descritos por la función f. Puesto que esta aplicación resulta frecuente, se suele llamar generación a cada paso.

Los sistemas continuos son aquellos en los que las variables son funciones del tiempo que obedecen ecuaciones diferenciales. Entre ellos tienen un interés especial los llamados sistemas hamiltonianos, en los que la energía se conserva.

La aplicación logística que consideramos a continuación es un sistema dinámico discreto que exhibe con claridad cómo puede haber una gran complejidad detrás de operaciones matemáticas muy sencillas. Dado el valor de una variable en el tiempo t, el que toma en el instante siguiente queda determinado por la función $f(x) = bx(1 - x)$, donde b es un parámetro que vale más que 1 y menos que 4, es decir, que $x_{t+1} = bx_t(1 - x_t)$. Si la entrada x_t está comprendida entre 0 y 1, la salida x_{t+1} lo está también, por lo que la sucesión x_0, x_1,..., x_t..., está formada por números también entre 0 y 1. Por ello se dice que se trata de un sistema dinámico en el intervalo unidad. Su significado es el de un modelo de evolución temporal, análogo al resultado de medir una variable en cualquier sistema a intervalos constantes de tiempo.

Ocurre que pequeñas variaciones en el valor del parámetro b conducen a diferencias espectaculares en el comportamiento de x_t. Si b es inferior a un valor crítico $b_c = 3{,}569945\ldots$, las sucesiones o trayectorias x_t son muy regulares; pero si b rebasa ese límite, irán variando de forma totalmente caótica en todo el intervalo (0,1).

Aunque este sistema fue estudiado por primera vez por P.J. Myrburg hacia el año 60, no suscitó interés general hasta que N. Metropolis, P. Stein y M. Stein descubrieron, 10 años más tarde, que sus propiedades las compartía una clase muy general de sistemas caracterizados por funciones f con un máximo de tipo cuadrático; es decir, aproximable por un polinomio de grado 2. Su comportamiento es, pues, muy representantivo.

Estudiemos el sistema para un valor pequeño de b. La sucesión x_t podría ser el número de individuos de una especie biológica en un territorio. Mediante una calculadora de bolsillo veríamos que tiende a un valor constante $x^* = (b-1)/b$, independiente de x_0. Todas las trayectorias se aproximan a ese límite común al crecer t. Como este valor de x parece atraer a todas las sucesiones, recibe el nombre de atractor. En nuestro ejemplo, x^* será el nivel natural al que tiende la población, sea cual sea la inicial. Si en un momento mueren muchos individuos, x decrecerá bruscamente, pero tenderá a recuperarse y volver a ese nivel natural [*véase la figura 3*]. Si x es menor que x^*, la población está por debajo de las posibilidades del territorio y x tiende a crecer; las condiciones de vida son favorables.

En cambio, si x es mayor que x^*, entonces x en el tiempo t será mayor que un intervalo después: la población tiende a disminuir, quizás por escasez de alimentos o de espacio para tantos.

El valor x^* se define por la condición $x^* = f(x^*)$, lo que significa que existe una sucesión con todos los valores iguales a x^*; si en un cierto tiempo la población tiene su nivel natural, permanecerá constante.

Al aumentar b, crecerá también x^*, lo que podría corresponder a un cambio favorable en las condiciones del territorio. Pero, cuando b supera el valor $b_1 = 3$, algo curioso sucede, pues el movimiento sigue siendo regular, pero ya no hay un límite común a todas las trayectorias. Antes bien, éstas tienden a oscilar entre dos valores x^*_1 y x^*_2, por lo que se dice que el atractor ha duplicado su período, que ahora vale 2. Si damos a la semilla el valor x^*_1 (o x^*_2), la sucesión oscilará exactamente entre x^*_1 y x^*_2. Se sabe que, en algunas ocasiones, las especies biológicas se comportan así, con alternancia de años de abundancia y otros de escasez, fenómeno que estudió el matemático V. Volterra ya en 1920, cuando un amigo pescador le explicó su sorpresa por las oscilaciones en las capturas de algunas especies en el Adriático.

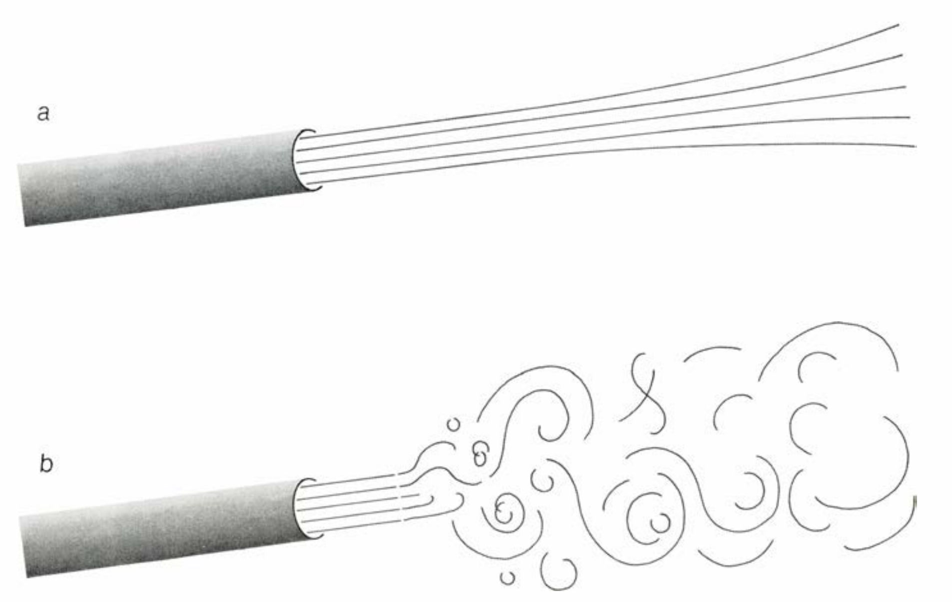
Si seguimos aumentando b pasaremos por un valor $b_2 = 3{,}449$. Resultará que, inmediatamente por encima, las soluciones tienden a un atractor de período 4, es decir, a un ciclo regular de cuatro generaciones que se va repitiendo. Y así encontraremos valores b_3, b_4, etcétera, con la propiedad de que, tras b_n, las trayectorias tienden a ciclos de período 2^n, después de su duplicación. El comportamiento ya no es tan sencillo, pero se sigue una pauta regular: basta esperar un tiempo suficiente para que las trayectorias se aproximen a movimientos periódicos. Son, pues, fácilmente predecibles.

Pero, si b supera el valor crítico b_c, antes indicado, la situación cambia radicalmente. A partir de b_c, las trayectorias recorren erráticamente el intervalo (0,1), sin seguir ninguna pauta reconocible, por muchas generaciones que esperemos. Además, dos semillas distintas, aunque estén muy próximas, originan sucesiones que, al cabo de cierto tiempo, no se parecen en nada; se dice que el sistema olvida las condiciones iniciales. Curiosamente, se han observado algunos casos de poblaciones de insectos o de pájaros que evolucionan de esa forma aparentemente caótica. Pero aún no se han acabado las sorpresas, pues en el intervalo entre b_c y 4 [máximo valor de b para que x no se salga de (0,1)] aparecen pequeñas ventanas de comportamiento regular. Por ejemplo, a partir de 3,84 hay una zona de período 3 que se transforma por duplicación en otras en el que éste vale 6,12, ..., y otras en que vale 5, etcétera. Y siempre esos movimientos regulares están arbitrariamente cerca de otros caóticos, pues se pasa de unos a otros por cambios infinitesimales en b.

¿Qué relación tienen las propiedades de este ejemplo académico con las de los sistemas de la vida real, necesariamente más complicados? Bastante más de lo que pueda parecer en una primera impresión. Las características de la transición al caos que acabamos de exponer, con la sucesión de valores críticos de un parámetro que corresponden a duplicaciones de períodos, son compartidos por muchos sistemas. El cociente entre $(b_n - b_{n-1})$ y $(b_{n+1} - b_n)$ tiende al valor $\delta = 4{,}669201...$, por ejemplo. En estos años se ha encontrado que ese mismo número aparece en numerosos sistemas físicos en variadas circunstancias, por ejemplo, en la transición del flujo laminar al turbulento de un fluido. Lo mismo puede decirse de otro valor llamado α, que caracteriza la distancia entre los dos valores en que se bifurca cada punto de un atractor al duplicarse el período en b_n. Esos dos números de Feigenbaum, como son conocidos, aparecen de modo universal y caracterizan la transición orden-caos; son fundamentales para la descripción de la naturaleza.

Por tanto, no solo el orden y el caos están íntimamente imbricados, sino también la transición del primero al segundo parece seguir una pauta general que se está empezando a entender. Conviene aquí hacer una observación. En la zona en que b es mayor que b_c, hay trayectorias que son a la vez caóticas (pues no siguen ninguna pauta y son impredecibles) y deterministas (pues están completamente determinadas por la semilla), porque una órbita determinista puede no ser predecible si los errores se amplifican necesariamente sin control, ya que se requiere entonces conocer la semilla con precisión infinita. Pero eso es imposible.

Veamos ahora un ejemplo de sistema continuo: el del péndulo sometido a una fuerza que varía periódicamente con el tiempo. El péndulo libre, es decir, moviéndose bajo la única acción de la gravedad, tiene soluciones que se comportan muy regularmente, de modo oscilatorio para energías pequeñas y de manera rotatoria si la energía es tan alta que llega a dar la vuelta; sus soluciones se pueden expresar de modo sencillo como combinación de funciones periódicas. Pero si a un péndulo se le aplica una fuerza que varía periódicamente con el tiempo y un amortiguamiento, entra en régimen caótico para ciertos valores de



5. TURBULENCIA Y NUMERO DE REYNOLDS. Los fluidos tienen movimientos regulares y turbulentos o caóticos. En el primer caso, representado en (*a*), las partículas de fluido siguen líneas de corriente bien determinadas que se separan lentamente, de modo lineal en el tiempo; además, dos partículas que pasan por el mismo punto con un intervalo temporal $\triangle t$ siguen la misma línea de corriente. Ninguna de estas dos propiedades se mantiene en el caso de movimiento turbulento, pues las partículas que en un cierto momento están próximas se separan deprisa, de modo exponencial, y sus trayectorias no guardan ninguna relación al cabo de un tiempo corto, por lo que se dice que olvidan las condiciones iniciales. El tipo de movimiento se caracteriza por el número de Reynolds *R*, cantidad sin dimensiones que es directamente proporcional a la velocidad característica del flujo, e, inversamente, a su viscosidad. Cuando *R* es pequeño, el flujo es regular, pero al aumentar se hace turbulento, tanto más cuanto mayor sea *R*. Las predicciones son válidas en un período de tiempo *T* que es grande si *R* es pequeño, pero que disminuye y llega a anularse al crecer *R*.

la amplitud y la frecuencia de esa fuerza: ello significa que la solución no se puede expresar como suma de funciones periódicas, y no se puede predecir. Este ejemplo tiene un interés doble: por un lado muestra cómo un pequeño cambio en una ecuación ya conocida puede modificar espectacularmente el comportamiento del sistema. Por otra parte no es puramente académico, pues se usa para modelar el comportamiento de una unión de Josephson sometida a radiación de microondas. Curiosamente hay observaciones experimentales de un ruido de fondo que se piensa que podría ser la manifestación de ese caos.

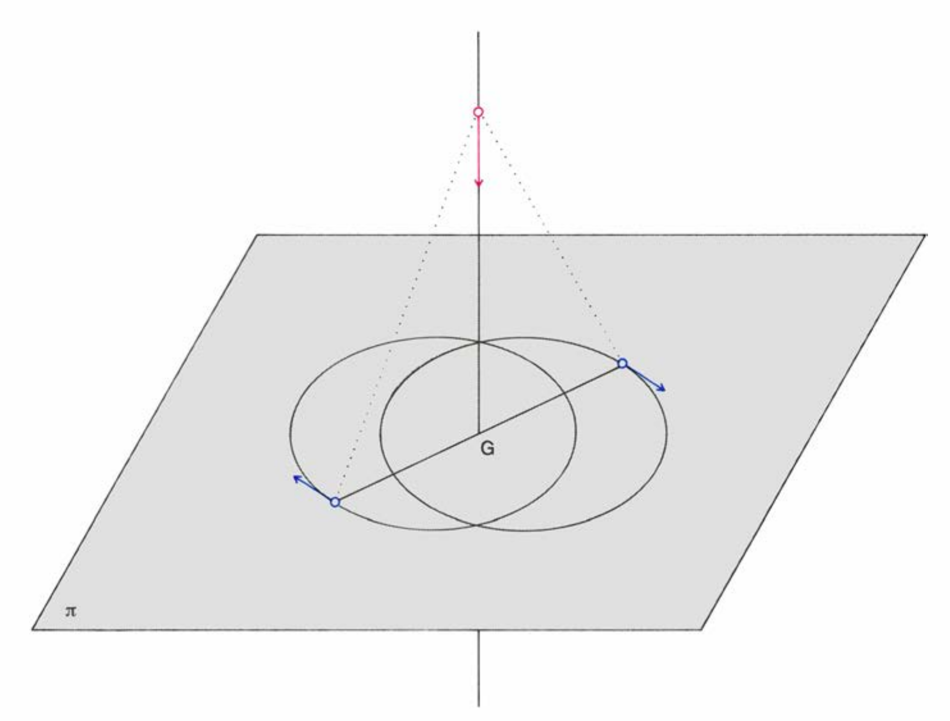
En la naturaleza son muchos los sistemas que oscilan. Pensemos en la suspensión de un automóvil, en el acoplo entre la precesión y la nutación del eje de la Tierra o en las vibraciones moleculares. Cuando son varias las coordenadas que oscilan y las fuerzas están dadas por funciones no lineales aparecen en general movimientos caóticos sin pauta regular si la energía de oscilación es alta.

Podríamos multiplicar los ejemplos, muchos de los cuales están empezando a estudiarse ahora, de manera especial en mecánica celeste, dinámica de poblaciones y meteorología. Quienes elaboran los informes sobre el estado del tiempo, el oleaje en el mar y pronósticos afines, son víctimas frecuentes del caos. Si se equivocan a veces no es por incompetencia, sino porque el movimiento de la atmósfera no es regular sino turbulento: pequeñas imprecisiones en los datos de las estaciones meteorológicas o, más importante aún, falta de datos ante un número insuficiente de ellas pueden hacer que resulte imposible la predicción más allá de algunas horas. Por ello, la meteorología impulsa hoy la construcción de superordenadores para, mediante métodos numéricos de extrema complejidad, conseguir prolongar el tiempo de predicción segura. El llamado efecto mariposa, propuesto por E. Lorenz, describe de modo hiperbólico el problema: Un meteorólogo que consiguiera llegar a una determinación totalmente precisa del estado de la atmósfera en un cierto momento y resolver las complicadas ecuaciones que rigen su movimiento vería invalidado su trabajo por la pequeñísima perturbación producida por el imprevisto batir de las alas de una mariposa. Tomada al pie de la letra, esta afirmación es exagerada, pero ilustra, de modo muy expresivo, la raíz de la dificultad: la sensibilidad extrema a pequeños cambios.

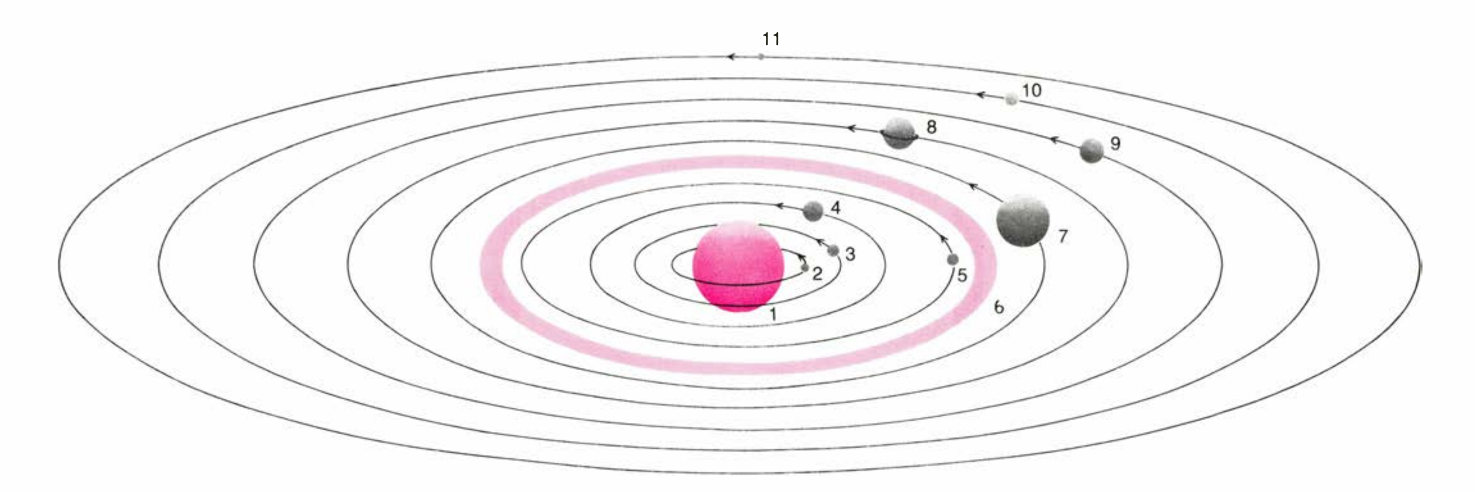
El problema fundamental en el estudio del movimiento de un sistema es la solución de sus ecuaciones, que expresan la evolución temporal de las n coordenadas y los n momentos (o, equivalentemente, de las n coordenadas y las n velocidades) de dicho sistema. Esos $2n$ valores representan un punto en el llamado espacio de las fases que tiene $2n$ dimensiones. Al avanzar el tiempo, ese punto se mueve describiendo una curva, por lo que se puede expresar la solución del problema como una familia de órbitas o trayectorias en dicho espacio de las fases. Por recordar el conjunto de líneas de corriente de un fluido, se habla del flujo asociado a las ecuaciones del movimiento, pudiéndose así emplear métodos geométricos de fácil intuición.

Para obtener esa solución es preciso hallar las $2n$ funciones que representan la variación en el tiempo de las n coordenadas y las n velocidades. Y para lograrlo es preciso reducir las ecuaciones diferenciales a integrales de funciones conocidas, lo que en la jerga usual se denomina reducirlas a cuadraturas, cosa que es imposible en general, en contra de una idea muy extendida. Cuando sí se puede hacer, se dice que el sistema es integrable y ocurre entonces que su comportamiento es regular y predecible. Cuando no, el sistema se llama no integrable y tiene sensiblidad fuerte a los datos iniciales y comportamiento caótico. El significado físico de la integrabilidad reside así en la posibilidad de obtener fórmulas analíticas que expresan la evolución del sistema en función del tiempo, para cualquier valor de éste. En el caso no integrable, esto no siempre es posible, pues las soluciones que expresan muchos de sus movimientos dejan de ser válidas al cabo de un tiempo, mayor o menor, pero finito. Debe insistirse, sin embargo, en que, aunque un sistema no integrable tiene siempre movimientos caóticos, no todos lo son en general, por lo que puede exhibir también otros regulares. La no integrabilidad de un sistema es una dificultad que no puede superarse simplemente recurriendo al análisis numérico, ya que la extremada sensibilidad a los errores, inevitables en todo método aproximado, hace muy difícil el cálculo con ordenador para tiempos cortos e imposible para tiempos largos.

Es muy necesario, pues, disponer de



6. SISTEMA formado por tres cuerpos que se atraen gravitatoriamente. No es integrable y tiene movimientos caóticos, como exhibe claramente el ejemplo, estudiado por Sitnikov. Un planeta de masa pequeña (*rojo*) está sometido al campo gravitario de una estrella doble, formada por dos primarias iguales (*azul*) que describen elipses alrededor de su centro de masas G y se mueve perpendicularmente al plano π de las elipses. El planeta oscila y su movimiento está caracterizado por los intervalos de tiempo entre dos cruces sucesivos del plano π. Llamemos a éstos τ_k. Bajo ciertas condiciones poco restrictivas, dada cualquier sucesión de números aleatorios, existe un movimiento cuyos τ_k coinciden con ellos. En otras palabras, hay conjuntos de soluciones asociadas a sucesiones infinitas de números al azar. El papel destacado que el orden y lo regular desempeñan en nuestra ciencia se debe, en buena medida, a que vivimos girando en torno a un Sol simple. Pues, como los valores de τ_k son lo análogo al período de nuestros planetas, un Kepler, miembro de una civilización situada en una órbita alrededor de una estrella en un sistema doble, se habría visto obligado a abandonar su propósito de encontrar leyes regulares para el movimiento de un sistema solar.



7. ESTABILIDAD DEL SISTEMA SOLAR. Como la masa de los planetas es unas mil veces menor que la del Sol, en una primera aproximación se puede despreciar el movimiento de éste y las fuerzas entre aquéllos. Se obtiene así un sistema integrable, con todos sus movimientos regulares, en los que cada planeta describe una elipse kepleriana. Pero, al tener en cuenta las interacciones entre los planetas, el problema deja de ser integrable y las elipses se modifican, no pudiendo excluirse la posibilidad de que alguno de ellos empiece a aumentar su distancia del Sol y se inicie una órbita caótica que lleve a su expulsión al espacio exterior. A lo largo del siglo XIX, muchos astrónomos se esforzaron en probar que esto no podía suceder y que el sistema solar era estable, pero sin conseguirlo. Incluso el rey Oscar II de Suecia ofreció un premio a quien aclarase esta cuestión, que fue concedido a Poincaré, por sus grandes contribuciones, a pesar de que no llegaron a dilucidar totalmente el problema. Desde 1954, gracias al teorema KAM, iniciales de Kolmogorov, Arnold y Moser, autores del mismo (y que dice que las perturbaciones pequeñas sólo destruyen parcialmente la regularidad), se piensa que la perturbación introducida por las fuerzas interplanetarias no destruye todas las órbitas regulares; antes bien, debido a la pequeñez de las masas de los planetas frente a la del Sol, la mayoría de los movimientos en los que los planetas siguen órbitas próximas a elipses de Kepler en un cierto intervalo de tiempo continúan así por siempre. Pero no todos, por lo que no se puede probar que el sistema solar esté en un movimiento regular y nunca se expulse un planeta o se produzca una colisión. Ese ha sido el destino de muchos de los miembros menores del sistema. Y así ocurrirá probablemente con Quirón, que se mueve entre Saturno y Urano en una órbita excéntrica inestable.

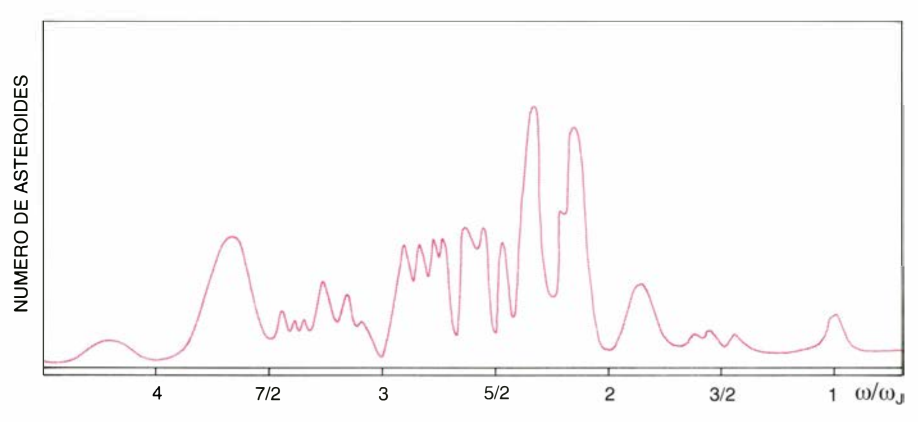
algún criterio que permita determinar si un sistema es integrable o no. Existe un teorema debido al francés Liouville (1855) que cumple precisamente esa misión y cuya importancia se acrecienta un siglo después de ser propuesto. Los sistemas hamiltonianos tienen todos al menos una cantidad conservada, la energía, que se mantiene constante a lo largo del tiempo. El teorema de Liouville afirma que si un sistema de n grados de libertad tiene no sólo una sino n cantidades conservadas independientes (la energía y otras n-1 más), su solución se puede obtener mediante cuadraturas.

Para comprender las implicaciones del teorema de Liouville consideremos algunos ejemplos. Los sistemas de un grado de libertad cumplen sus condiciones, pues tienen una cantidad conservada, la energía, por lo que son todos integrables y no caóticos. Así, toda partícula moviéndose en una dimensión bajo la acción de una fuerza dependiente de su posición lo hace siempre de modo regular. En el caso de 2 grados de libertad, un punto material en un plano por ejemplo, partiendo de que la energía es constante bastará, para que el sistema sea integrable, con que tenga otra variable conservada independiente de la energía. Esto ocurre si la fuerza no depende de la dirección, sino sólo de la distancia, pues entonces se conserva el momento cinético. La famosa ley de las áreas de Kepler (áreas barridas en tiempos iguales son iguales) equivale a la conservación del momento cinético, por lo que garantiza que un planeta sometido a la fuerza del Sol se mueve de modo regular y no caótico en el plano de su órbita.

Pero en el caso de una fuerza **F** cualquiera no existe esa segunda ley de conservación, por lo que el problema del movimiento de un punto en el plano no es integrable en general. No lo es, por ejemplo, si **F** tiene por componentes $F_x = -kxy^2$; $F_y = -kx^2y$ (o, equivalentemente, si el potencial es **V** igual a la mitad de kx^2y^2), donde k es una constante. La inocencia aparente de esta fuerza muestra de nuevo cómo el comportamiento caótico suele ir asociado a formas simples.

En un sistema de n grados de libertad, podemos asegurar que es integrable si encontramos n cantidades conservadas que cumplen las condiciones del teorema de Liouville. Si no las hallamos, no podremos asegurar nada, porque quizás esto se deba a la dificultad del problema o a no haberlas buscado con suficiente habilidad. Pero algunas veces es posible probar que esas magnitudes no existen, por lo que el sistema debe ser caótico. El más famoso de ellos es el de los tres cuerpos que se atraen gravitatoriamente; ya en el siglo XIX, Bruns y Poincaré demostraron que no tiene un número suficiente de cantidades conservadas.

Tras conocer la caracterización de los sistemas integrables dada por el teorema de Liouville, surge de modo natural una pregunta. Admitiendo que existen sistemas no integrables que ofrecen un comportamiento caótico, ¿cuál es la relevancia real de ese fenómeno? En otras palabras, ¿son los sistemas no integrables casos patológicos que no deben afectar al desarrollo de una teoría del movimiento más que como una curiosidad? O, por el contrario, ¿tienen cierta importancia en el mundo físico? ¿Es la integrabilidad la norma o la excepción? Supongamos que un ordenador elige sistemas dinámicos hamiltonianos al azar, para lo que bastaría con generar ecuaciones de movimiento de manera aleatoria, por ejemplo, dando los coeficientes de su desarrollo en serie. Pues bien, en general el sistema así obtenido será no integrable y caótico y sólo de modo excepcional será integrable y regular. Esto es una consecuencia inmediata de dos teoremas de C.L. Siegel, sugeridos en la obra de Poincaré, que se refieren a sistemas dinámicos analíticos, es decir, cuyas funciones de energía son desarrollables en serie; dichos teoremas afirman que, dado un sistema cualquiera, integrable o no, existen infinitos otros no integrables cuyas ecuaciones se diferencian de las del primero



8. LOS ASTEROIDES se mueven bajo la acción del Sol, con períodos de revolución que dependen de su distancia, pero están sometidos a la perturbación debida a Júpiter. Por tanto, según el teorema KAM, algunos de sus movimientos son regulares y otros caóticos. Los que se mueven regularmente permanecen en sus órbitas, pero los que siguen trayectorias caóticas terminan por desaparecer al cabo del tiempo. Hace ya más de 100 años que se sabe que la distribución del número de asteroides en función de su frecuencia de revolución alrededor del Sol presenta ausencias en aquellas cuyo cociente por la de Júpiter es un número racional *m*/*n*, con *m* y *n* pequeños, que es lo que cabe esperar del teorema citado; pues los que faltan estarían en resonancia con el planeta, cuyo efecto, al cabo de muchos ciclos, acaba por sacarles de su órbita. Algo parecido ocurre con Saturno, donde la perturbación debida a algunos satélites es la causa de los huecos entre los anillos.

tan poco como se quiera, pero que no existen, en general, infinitos sistemas integrables con la misma propiedad. Por tanto, cualquier pequeña modificación de un sistema dotado de comportamiento regular puede introducir caoticidad. De donde se infiere que la integrabilidad y regularidad son excepción, no la norma.

En el caso de sistemas integrables, las trayectorias aparecen ordenadamente en el espacio de las fases de $2n$ dimensiones, ocupando de modo natural superficies de n dimensiones. Cuando hay caos, algunas trayectorias adquieren una forma tan compleja y retorcida que se salen de toda superficie de ese tipo y exploran incluso volúmenes de $2n$ dimensiones. Esto suele ocurrir sólo en algunas regiones, mientras que en otras las trayectorias son regulares. Como nunca podemos eliminar los efectos del resto del universo sobre un sistema, resulta especialmente importante saber lo que ocurre cuando se perturba ligeramente un sistema integrable. El formado por sólo dos cuerpos en interacción gravitatoria lo es, por lo que un ejemplo de lo anterior podría ser el planeta Marte moviéndose bajo la acción del Sol y sometido a la fuerza perturbadora de Júpiter. O también todo el sistema solar, considerando como perturbación al movimiento en elipses de Kepler las fuerzas entre los planetas y los de éstos sobre el Sol, que se pueden despreciar en una primera aproximación. Ninguno de estos dos sistemas es integrable, lo que puede parecer sorprendente por lo arraigada que está en nuestra cultura la idea de la regularidad del sistema solar.

Pero la no integrabilidad implica la existencia de movimientos desordenados y turbulentos, por lo que podría ocurrir que los efectos de las fuerzas entre los planetas, aunque débiles en comparación con las producidas por el Sol, vayan alejándolos poco a poco de sus órbitas keplerianas, iniciando un movimiento caótico que acabe incluso con la expulsión de uno de ellos.

El importante teorema KAM (iniciales de Kolmogorov, que lo propuso en 1954, y de Arnold y Moser, que completaron la prueba pocos años más tarde) aclara este problema. Afirma que, al introducir una perturbación a un sistema integrable cuya intensidad se caracteriza por el parámetro ϵ, aparece caos, pero su extensión e importancia dependen de ϵ. El volumen del espacio de las fases con comportamiento caótico tiende a cero con ϵ y aumenta asimismo con él, por lo que los movimientos regulares y caóticos coexisten, estando incluso arbitrariamente cerca los unos de los otros. En otras palabras, las perturbaciones pequeñas a un sistema integrable introducen turbulencia y caos, pero respetan parte del orden, dependiendo la proporción de cada uno en la intensidad perturbadora. Aplicado al sistema solar, el teorema KAM permite asegurar que hay movimientos regulares, en los que los planetas se mueven en órbitas muy próximas a elipses de Kepler. Pero no se puede asegurar que estemos ahora en uno de ellos [*véase la figura 7*].

Todas estas consideraciones se refieren a sistemas hamiltonianos en los que se conserva la energía. En el caso más extremo, no hay ninguna otra cantidad conservada, por lo que estamos lo más lejos posible de las condiciones del teorema de Liouville. El caos se generaliza entonces a todos los movimientos, que aparecen erráticamente entremezclados. De manera más precisa las órbitas, salvo posiblemente algunas excepcionales, llegan a pasar arbitrariamente cerca de los puntos representativos de todos los estados posibles. Estos sistemas se llaman ergódicos, porque cumplen la hipótesis ergódica de que se habló antes. Las consideraciones precedentes muestran que, tras muchos años de confusión, se empieza a entender el problema planteado por Boltzmann y que su famosa hipótesis ergódica es incorrecta: los sistemas integrables, totalmente regulares, y los ergódicos, totalmente desordenados, son casos extremos, teniendo el sistema genérico movimientos de los dos tipos. Conviene añadir que se sabe que la ergodicidad simple representa un grado muy reducido de desorden. A partir de ella hay toda una sucesión de formas de caos de violencia creciente que son objeto hoy día de gran atención. Entre ellos cabe mencionar el llamado gas de esferas duras, que sirve de modelo de multitud de fenónemos, como son la difusión de una mezcla de gases o un gas en un recinto.

En los razonamientos anteriores se habla frecuentemente de movimiento regular como de aquel que puede predecirse y de caótico o turbulento como aquel en el que eso es imposible porque no aparece ninguna pauta regular. El concepto de regularidad tiene una larga tradición científica. Se usa mucho en expresiones tales como "regularidad de la naturaleza" y se suele decir que uno de los pasos más importantes del método científico consiste en observar regularidades para tratar luego de explicarlas. Pero, ¿qué es realmente una pauta regular? Trataremos ahora de dar un sentido preciso a este difícil concepto. Al observar un cambio o un movimiento, es posible a veces reconocer una recurrencia clara. Tal es el caso cuando el fenómeno estudiado es periódico, como ocurre con la sucesión del día y la noche o con la de las cuatro estaciones. Pero, si no sucede así, no se puede asegurar que, tras un tiempo suficiente, no aparezca alguna pauta imprevista.

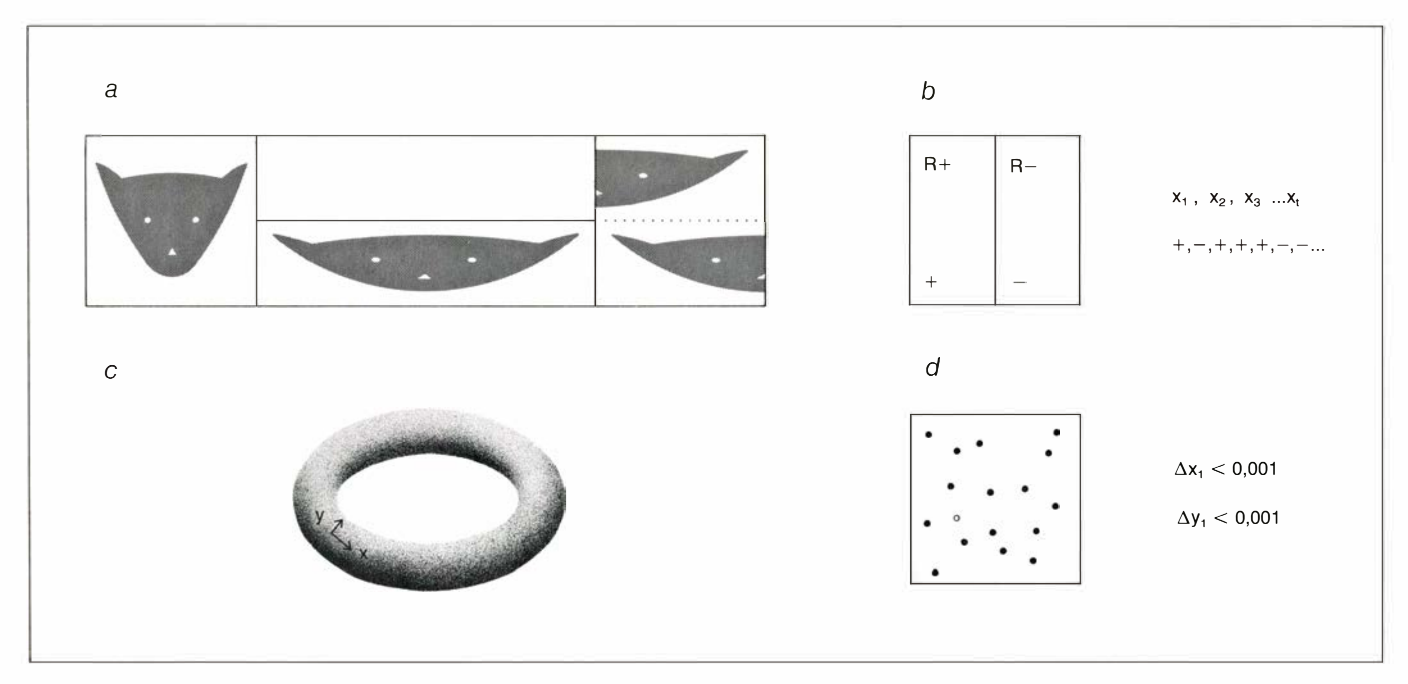
Para aclarar esta cuestión conviene considerar la llamada evolución en grano grueso del sistema. Divídese, con tal fin, el espacio de las fases en un cierto número m de celdas, y se realizan observaciones a intervalos regulares (cada segundo, cada día o cada

año), anotando el número de la celda en que está el punto representativo del sistema en ese momento y obteniendo así una sucesión de números menores o iguales a *m*. Si el movimiento no es caótico, la sucesión tendrá alguna regularidad; en la situación contraria no se observará ninguna, y la lista de números será semejante a la obtenida jugando repetidamente con una ruleta de *m* resultados posibles o tirando un dado con *m* caras iguales.

Sírvanos de ejemplo el estudio del movimiento del Sol sobre el fondo de las estrellas, dividiendo el cielo en 12 celdas iguales. Si anotamos el número de la celda en que está cada mes, obtendremos una sucesión de números entre 1 y 12 de gran regularidad, pues no sólo es periódica, sino incluso sinusoidal (reciben este nombre las funciones de la forma A sen ϕ, con $\phi = \omega t + \phi_0$, siendo t el tiempo, ω la frecuencia y A y ϕ_0 cantidades constantes), por lo que tiene una sola frecuencia que vale un ciclo por año. No cabe duda de que, conociendo la posición del Sol hasta el mes actual podemos predecir con éxito cual será la del próximo (esta división del cielo en 12 partes es la usada en astrología para realizar los horóscopos). Hay otros casos en que el movimiento se puede escribir como suma de varios términos sinusoidales, cada uno con una frecuencia distinta, por lo que se aplica el nombre de casi periódicos. Cuando así ocurre, la regularidad es algo más complicada, pero aún reconocible. Si, por ejemplo, observamos a Júpiter y anotamos su posición cada mes, nuestros datos reflejarán mezcladas las dos frecuencias de movimiento de revolución de Júpiter y de la Tierra alrededor del Sol. Si estudiamos uno de sus satélites, tendremos tres frecuencias, ya que habrá que añadir a las anteriores la del movimiento de éste alrededor de Júpiter.

En general, los sistemas casi periódicos con *n* frecuencias tienen pautas de evolución más complicadas que los simplemente periódicos, pero pueden ser considerados como regulares, aunque al crecer el número de frecuencias se hace más difícil hacer predicciones fiables, por razones de tipo práctico. Pero hay sistemas cuyas trayectorias son tan complejas que, para expresarlas como superposición de movimientos periódicos, se necesita un número infinito de frecuencias, de forma que el llamado espectro de frecuencias es continuo. En esos casos, por mucho que se analice su comportamiento y por mucho tiempo que se espere, nunca podremos encontrar una recurrencia permanente. Son los casos en que hay sensibilidad fuerte a los datos iniciales; son también los movimientos caóticos. De esta manera se identifica la pauta regular con conjunto discreto de frecuencias. Conviene advertir que, aun en el caso continuo, se pueden hacer predicciones, pero su fiabilidad desaparece siempre al cabo de un cierto tiempo, que será tanto menor cuanto mayor sea la intensidad del caos. Como dice gráficamente Ilya Prigogine, nuestra visión del mundo se realiza a través de una ventana temporal, más allá de la cual nuestro conocimiento desaparece.

Para precisar un poco más estos conceptos consideremos un sistema dinámico discreto en el intervalo (0,1), determinista y de gran sencillez, que, a pesar de ello, posee órbitas equivalen-



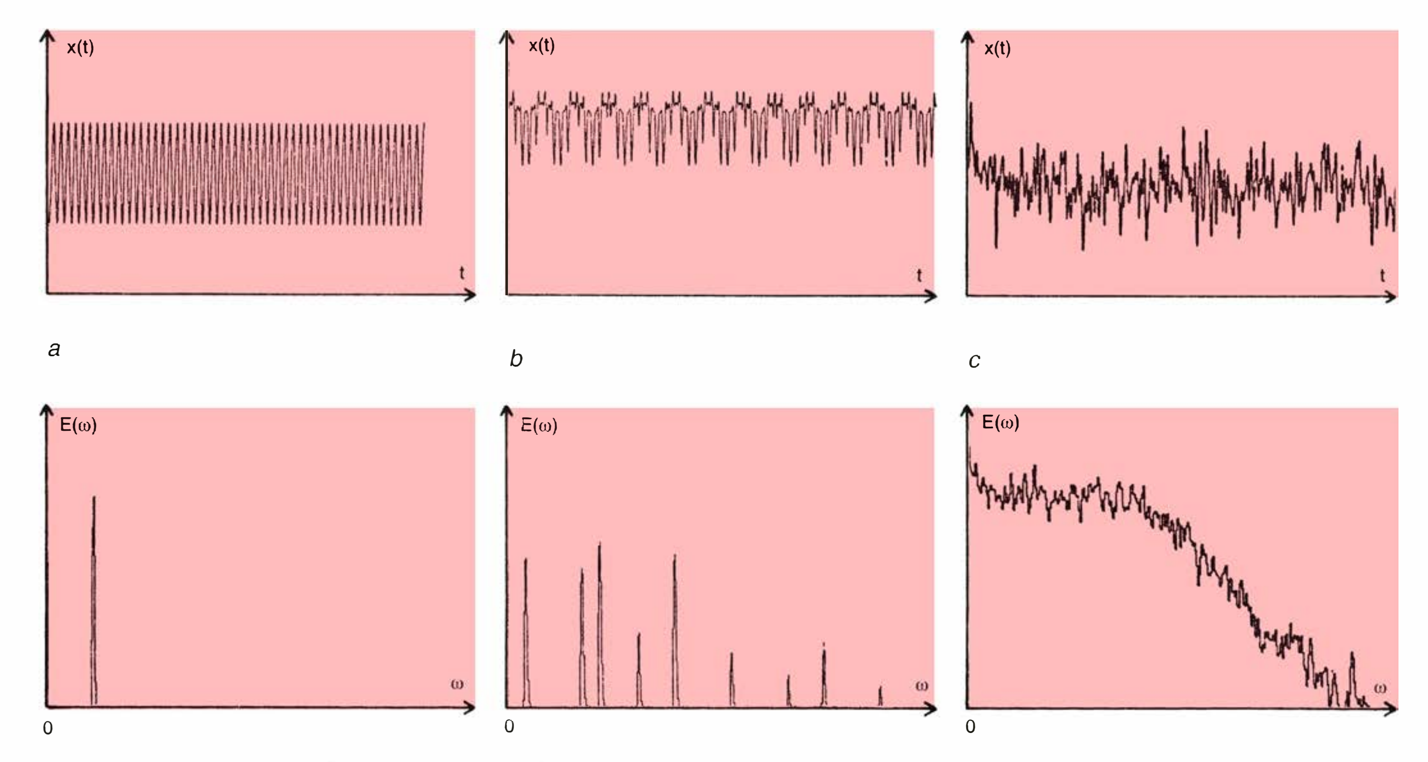
9. TRANSFORMACION DEL PANADERO. Se trata de un sistema dinámico en el que un punto evoluciona en el cuadrado unidad a intervalos discretos de tiempo. Si (x_t, y_t) son sus coordenadas en el instante *t*-simo, sus valores en el probar que el sistema solar esté en un movimiento regular y nunca se expulse x_t se encuentre entre 0 y 1/2. Cuando x_t se halle entre 1/2 y 1, los valores de las coordenadas serán: $x_{t+1} = 2x_t - 1$; $y_{t+1} = (y_t + 1)/2$. Como se ve en (*a*), se trata de un movimiento parecido al que hace un panadero sobre la masa, lo que da origen a su nombre. Partiendo de una semilla o punto inicial (x_0, y_0), queda totalmente determinada la sucesión (x_1, y_1), (x_2, y_2)..., (x_t, y_t)..., mediante operaciones muy simples (multiplicación y división por 2, suma y resta de 1). Es, por tanto, un sistema determinista. A pesar de ello, tiene un comportamiento extremadamente caótico, que hace imposible la predicción para valores grandes de *t*. Por ejemplo, si dividimos el cuadrado en las regiones R_+ y R_-, y asignamos a cada x_t un signo más o un signo menos, según en cuál de ellas se encuentre, las sucesiones de signos tienen, en general, las mismas propiedades que las de los resultados de un juego a cara o cruz. Los valores *x* e *y* pueden considerarse coordenadas en un toro (*c*), representando en ese caso cada una el número de vueltas a lo largo de uno de los caminos irreducibles. Por eso se dice que esta transformación define un sistema dinámico sobre el toro. Al cabo de *n* intervalos de tiempo, cualquier figura aparece rota en piezas verticales que se distorsionan al extenderse en *n* bandas horizontales, por lo que cualquier estructura se hace rápidamente irreconocible. Toda región se llega a romper en cada paso en varias separadas, por lo que un conjunto de puntos próximos entre sí se reparte uniformemente en el cuadrado al crecer *t*, como se puede comprobar fácilmente mediante cálculos simples, por lo que se pierde memoria de la situación inicial. En (*d*) aparece representada la décima generación de 16 semillas que distan entre sí menos de 0,001 y están dentro del círculo; se reparten por el cuadrado de manera caótica. Los errores se agrandan de tal modo que, si la semilla se conoce con una aproximación de $1/2^n$, se ignora totalmente la situación del sistema a partir de la generación *n*-sima. La transformación del panadero sirve de modelo para sistemas de comportamiento extremadamente caótico denominados mezcladores, en los que se pierde rápidamente la información de la situación inicial.

tes a sucesiones infinitas de tiradas a cara o cruz. Se trata del sistema definido por la ecuación $x_{t+1} = 2x_t$(módulo 1) donde (módulo 1) significa que se resta la parte entera y nos quedamos con la parte decimal. De esta forma se obtiene una sucesión de números x_0, x_1, x_2..., x_t... que está completamente determinada por la semilla x_0. No nos importa ahora la interpretación física de esos números, pues nos sirven únicamente de modelo de evolución determinista. Podemos pensar en ellos como en los valores de una variable de cualquier sistema medidos a intervalos constantes de tiempo o en la población de una especie en un territorio en generaciones sucesivas. Lo que importa es que sus propiedades, que son de estudio simple, pueden aparecer en otras pautas de evolución.

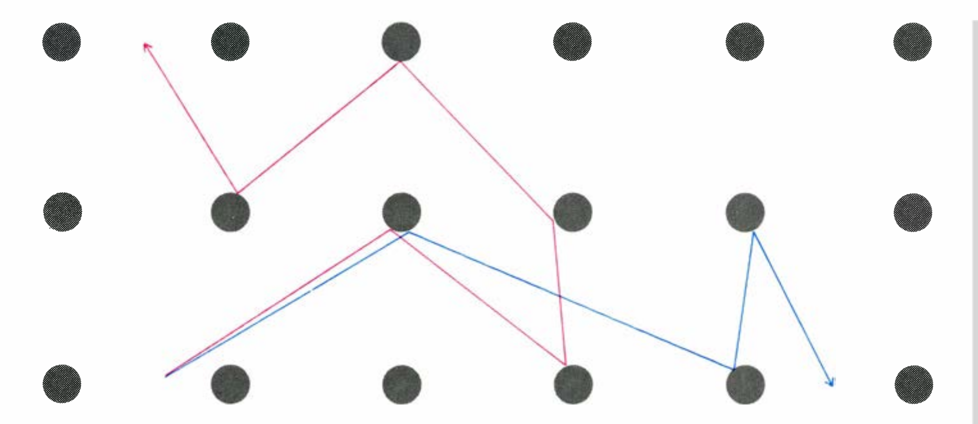
Dado el valor de x en el tiempo t, para obtener el correspondiente a $t+1$ basta con multiplicar por 2 y tomar la parte decimal; las operaciones son simples (un ejemplo de sucesión sería 0,65; 0,3; 0,6; 0,2; 0,4...). Es fácil, además, obtener la solución correspondiente a toda semilla x_0; evidentemente ésta es $x_t = 2^t x_0$ (módulo 1). Resulta conveniente expresar la ecuación en base 2, en la que todos los números del intervalo (0,1) se escriben como una sucesión infinita de ceros y unos, tras un cero y la coma decimal; así, por ejemplo, x_0 = 0,100111101... En base 10, multiplicar por 10 y restar la parte entera a un número entre 0 y 1 equivalen a borrar la primera cifra decimal. Lo mismo ocurre en base 2, por lo que el paso de una generación a la siguiente se realiza también quitando el primer dígito tras la coma; x_t se obtiene, pues, de la semilla x_0 borrando las primeras t cifras. Descúbrese así que todos los x_t están determinados por la cadena de dígitos de x_0. La de un número racional (es decir, de la forma p/q con p y q enteros) es periódica, a partir de un cierto dígito, mientras que la de un irracional no sigue ninguna pauta reconocible. Por ello, las semillas racionales dan sucesiones periódicas; las irracionales, caóticas. Y como todo racional está infinitamente cerca de irracionales y viceversa, el orden y el caos están aquí íntimamente imbricados.

Dos semillas muy próximas dan lugar a sucesiones que, al cabo de un tiempo, no tienen nada que ver entre sí. Pues si coinciden sus n primeras cifras, los valores posteriores a x_n serán totalmente distintos, si difieren en la $n+1$. Análogamente, si x_0 se conoce sólo con n cifras decimales, no se puede decir nada de x_{n+1}, ya que éste se obtiene borrando esas n cifras. Esto se debe a que en cada paso se dobla el error, por lo que llega a ser tan grande que la predicción es imposible, a pesar de que se trata de un sistema determinista. La única forma de poder predecir para todas las generaciones es conocer las infinitas cifras decimales de x_0, lo que es imposible. Tenemos así un sistema que es caótico y determinista; caótico o turbulento porque la mayoría de sus movimientos no siguen pautas regulares; determinista, porque la semilla determina la sucesión y, además, impredecible porque hay sensiblidad fuerte a las condiciones iniciales. Por sorprendente que resulte, son muchos los sistemas físicos que se comportan así.

Consideremos ahora una partición de grano grueso muy sencilla, formada por sólo dos celdas: la de la izquierda, a la que asignamos el dígito 0 y que consta de los números menores que 1/2, y la de la derecha, constituida por los que son mayores o iguales que 1/2 a la que denominaremos celda 1. Como los números de la primera empiezan su parte decimal con cero y con uno los de la segunda, la sucesión de las medidas que indican si x_t está a la derecha o a la izquierda coincide exactamente con la de cifras decimales de x_0. Ahora bien, si nos dan una sucesión de 1 y 0, ¿es posible determinar si procede de una semilla x_0 o de una sucesión de



10. ESPECTRO DE FRECUENCIAS DE UN MOVIMIENTO. Para estudiar el tipo de evolución temporal dado por la función $x(t)$ conviene examinar su espectro de frecuencias $E(\omega)$; $x(t)$ podría representar cualquier variable de cualquier sistema (por ejemplo, una señal luminosa, el registro de un encefalograma o de un sismógrafo o la temperatura media de una ciudad en el mes t-simo) y su espectro de frecuencias es análogo al de colores de la luz o al de notas musicales del sonido. Se han representado tres casos y, en cada uno, la señal $x(t)$ y su espectro de frecuencias $E(\omega)$. Cuando la señal es sinusoidal pura (*a*), sólo hay un "color", es decir, una frecuencia, indicada por el pico en $E(\omega)$. La evolución es muy regular. En el caso casi periódico (*b*), intervienen varias frecuencias (nueve en el caso de esta ilustración) y la evolución es simple, aunque más compleja que en (*a*). Cuando el espectro es continuo (*c*), la señal resulta ser caótica.



11. MODELO SIMPLIFICADO de la evolución de una molécula colisionando con otras iguales en un gas. Una partícula puntual se mueve en un billar formado por discos regularmente espaciados en los que rebota de forma elástica. El movimiento es impredecible porque las trayectorias próximas se separan exponencialmente, con una sensibilidad muy fuerte a cambios en los datos iniciales. Para predecir el movimiento dando los *n* discos correspondientes a las primeras *n* colisiones, es necesario especificar la posición y la velocidad inicial con un número de cifras significativas, *C*, proporcional a *n*. Con las dimensiones de la figura, para predecir 12 colisiones se necesita conocer los datos iniciales con un error menor que una billonésima y si los conocemos con *n* cifras significativas no podremos decir nada de la evolución desde la colisión $n+1$.

tiradas de una moneda, asignando 0 a la cara y 1 a la cruz? Se suele decir que son indistinguibles, en general: se trata, en efecto, de sucesiones aleatorias.

Pero, ¿qué significa que una sucesión sea aleatoria? La teoría de la complejidad, debida sobre todo al matemático ruso Kolmogorov, viene en nuestro auxilio. En ella la regularidad de una sucesión se caracteriza por la cantidad de información necesaria para especificarla. Pues cuanto más regular u ordenada sea, menos información encierra y recíprocamente. Por simplicidad seguimos considerando sólo sucesiones binarias de 0 y 1; cada término contiene 1 bit de información. Resulta, por ello, natural definir la complejidad $K^{(n)}$ (K por Kolmogorov) de una cadena de n ceros o unos como el número de bits del programa de ordenador más corto con el que se puede imprimir esa cadena. (Kolmogorov mostró que existe un ordenador universal que es capaz de conseguir el programa más corto.)

Supongamos ahora una sucesión muy simple, formada por n ceros; el programa mínimo sería "IMPRIMIR 0, n veces", que consta aproximadamente de $\log_2(n)$ bits para n grande. En el otro extremo, la longitud del programa para la sucesión $\{a_n\}$, por muy compleja que ésta sea, no puede ser mucho mayor que n, pues siempre se puede usar el programa "IMPRIMIR a_1, a_2, ..., a_n" que tiene aproximadamente n bits para n grande. En el caso de máxima complejidad, la forma más simple de especificar la cadena es enumerarla; parece adecuado pues, calificarla como aleatoria y, en nuestro contexto, caótica. Yendo ahora al caso de sucesiones infinitas, se define su complejidad como $K = \lim(K^{(n)}/n)$, con n que tiende a crecer infinitamente; si se trata de una repetición del mismo dígito, ese valor tiende a cero y lo mismo ocurre si es periódica. Esto indica que en una sucesión periódica hay información redundante.

En el caso de que K sea mayor que cero la complejidad es máxima y la sucesión merece el calificativo de aleatoria, y el movimiento asociado de caótico, pues es totalmente impredecible, al ser incalculable mediante la iteración de un algoritmo finito. Volviendo ahora a nuestro ejemplo, se puede probar que casi todas las sucesiones tienen máxima complejidad, por lo que las órbitas correspondientes son realmente caóticas, pues la mayoría de los reales, en el sentido de la medida, tienen cadenas de dígitos de máxima complejidad y son, por tanto, incalculables mediante la repetición de un esquema que contenga un número finito de operaciones.

Estas ideas nos pueden llevar a comprender en qué consiste el movimiento caótico. Simplemente, la mayoría de los sistemas dinámicos tienen trayectorias que no pueden calcularse para todo valor del tiempo mediante la iteración de un algoritmo finito y están, por tanto, fuera de la capacidad de una inteligencia humana. Como el sistema dinámico genérico tiene a la vez movimientos calculables e incalculables, la introducción de las probabilidades y el dualismo determinismo-probabilismo es una necesaria manifestación de la finitud del hombre en su lucha por conseguir una descripción matemática de la naturaleza.

Crecimiento, diferenciación y remisión del cáncer

Ciertas proteínas regulan el crecimento normal de los glóbulos blancos y su diferenciación en formas que no se dividen. Se ha logrado que las células leucémicas sigan ese desarrollo y pierdan el carácter maligno

Leo Sachs

Todas las células del cuerpo descienden de otras precursoras, las denominadas células madre. Dotadas éstas de la capacidad de multiplicarse rápidamente, su descendencia, tras madurar y diferenciarse en formas especializadas, deja de crecer. Durante la infancia y el estado adulto normales los procesos de multiplicación y diferenciación están en armonía: el crecimiento de las células madre aporta nuevo tejido y remplaza a las células que van muriendo, mientras que el cese del crecimiento, una vez han alcanzado las células su forma final, mantiene controlada la multiplicación celular. En el cáncer esa armonía se destruye: se multiplica un número excesivo de células inmaduras.

La comprensión de las regulaciones a que están sometidos los procesos de crecimiento y diferenciación en las células normales permite responder varias preguntas acerca de ese mal. ¿Se trastocan en las células malignas todos los mecanismos celulares que controlan el crecimiento y la diferenciación, o bien se mantienen indemnes algunos? Si los hay que funcionan con normalidad, ¿podrían reactivarse para que las células cancerosas se diferenciaran y cesaran de crecer? He llegado a la conclusión de que las células cancerosas pueden conservar las bases genéticas que permitan su diferenciación. Adecuadamente estimuladas llegan a completar la sucesión normal de crecimiento, diferenciación y cese del crecimiento. Estos hallazgos han abierto nuevas posibilidades para el tratamiento del cáncer.

He estudiado el proceso de crecimiento y diferenciación en células sanguíneas normales y leucémicas. Durante la hematopoyesis, proceso por el cual el cuerpo genera nuevas células sanguíneas, una sola clase de precursor (las células madre pluripotentes de la médula ósea) se desarrolla en numerosas células precursoras más especializadas, entre las que se cuentan las células madre mieloides y precursores de los linfocitos. Estas células madre más especializadas, a su vez, maduran y se diferencian en los diversos tipos de glóbulos blancos y glóbulos rojos de la sangre. Como sistema modelo que someter a estudio se eligieron las células madre mieloides, los glóbulos blancos maduros que proceden de aquéllas y las células mieloides leucémicas. En la leucemia mieloide, las células parecen quedar congeladas en su forma precursora, sin diferenciarse en células maduras y, por tanto, persistiendo en su multiplicación.

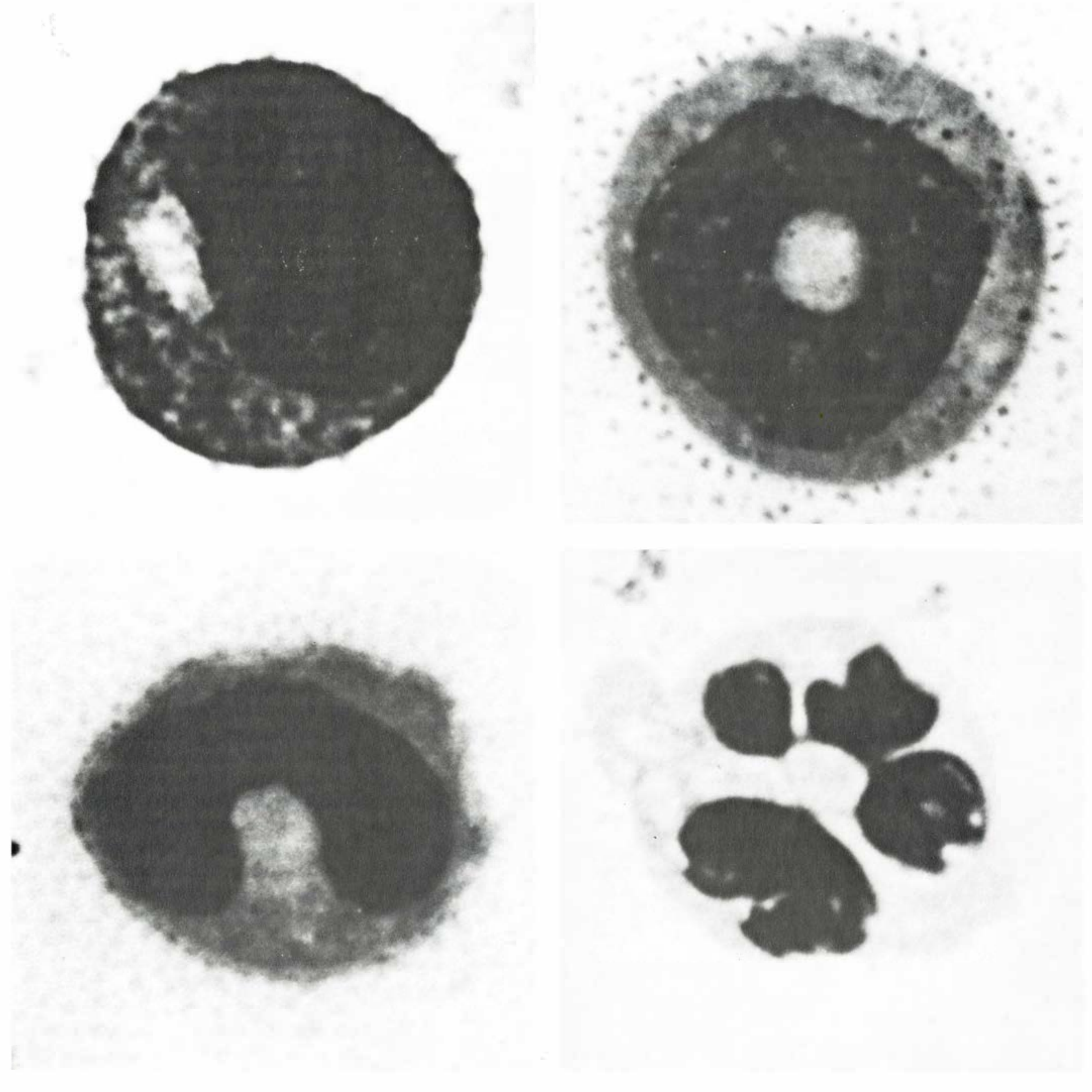
Al tratar de establecer los principios fundamentales que gobiernan el crecimiento y la diferenciación de las células, así como la reversibilidad de la malignidad, tuve que desarrollar un sistema de cultivo de células que me permitiese observar el proceso in vitro. En 1963, cuando trabajaba con mi discípulo Haim Ginsburg, en el Instituto Weizmann de Ciencias de Israel, encontré que si introducía los precursores de células sanguíneas normales en un medio de cultivo líquido que contuviera fibroblastos (células de tejido conectivo) los precursores se multiplicaban hasta formar clones (descendientes de una sola célula) y finalmente se diferenciaban. En 1965, contando con la colaboración de otro discípulo, Dov H. Pluznik, demostré que los clones también podían desarrollarse y diferenciarse en un medio semisólido de agar. El gel inhibía la movilidad de las células, por lo que resultaba más fácil distinguir los clones aislados. En 1966, Thomas R. Bradley y Donald Metcalf, de la Universidad de Melbourne y del Instituto Walter y Eliza Hall de Investigación, también de Melbourne, clonaron asimismo células precursoras en agar. Los primeros precursores normales a los que se aplicó el método fueron células madre mieloides que produjeron macrófagos y granulocitos.

Los macrófagos y los granulocitos son las células fagocíticas del cuerpo; engloban y eliminan el material extraño, incluidos los microorganismos invasores. Los macrófagos exhiben también sobre su membrana celular algunas moléculas del material foráneo que han englobado, donde las "reconocen" otras clases de glóbulos blancos; a partir de ese reconocimiento se desencadena la respuesta inmunitaria contra el intruso. James E. Till y Ernest A. McCulloch, de la Fundación para el Tratamiento e Investigación sobre el Cáncer, de Ontario, han demostrado que, en el cuerpo, los macrófagos y los granulocitos se desarrollan a partir de una forma precursora común, las células madre mieloides. Por tanto, las células de nuestro cultivo seguían la misma pauta de desarrollo que se da en el cuerpo.

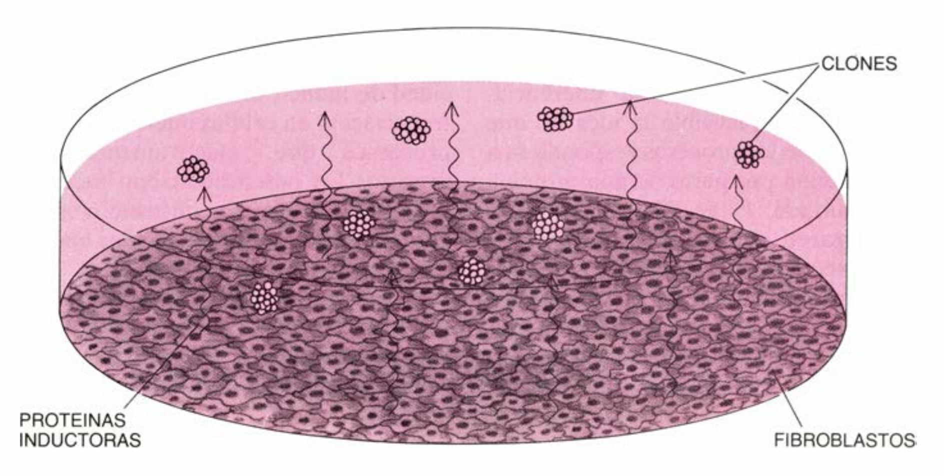
¿Cuál era la función de los fibroblastos, que debían hallarse en el cultivo a modo de "capa nutricia" para que las células mieloides lograran crecer y diferenciarse? Había demostrado en 1965 que las células de la capa nutricia secretan sustancias que inducen el crecimiento y la diferenciación. Al año siguiente, trabajando con mis alumnos Pluznick y Yasuo Ichikawa, comprobé la detección de inductores en el medio de cultivo. Además, los inductores que actuaban sobre clones que contenían diferentes tipos de células parecían ser distintos entre sí. Purificados los inductores, vimos que se trataba de proteínas, bien glicoproteínas (proteínas enlazadas a azúcares) o bien proteínas sin

azúcares detectables. No parecía que los azúcares fueran indispensables para la actividad de los inductores. Utilizando ese mismo sistema de cultivo celular otros laboratorios han aislado proteínas inductoras para todas las clases de células sanguíneas, incluidos los diversos tipos de linfocitos. Según se ha comprobado, una amplia gama de tipos celulares pueden segregar proteínas inductoras, tanto en cultivo como en el cuerpo.

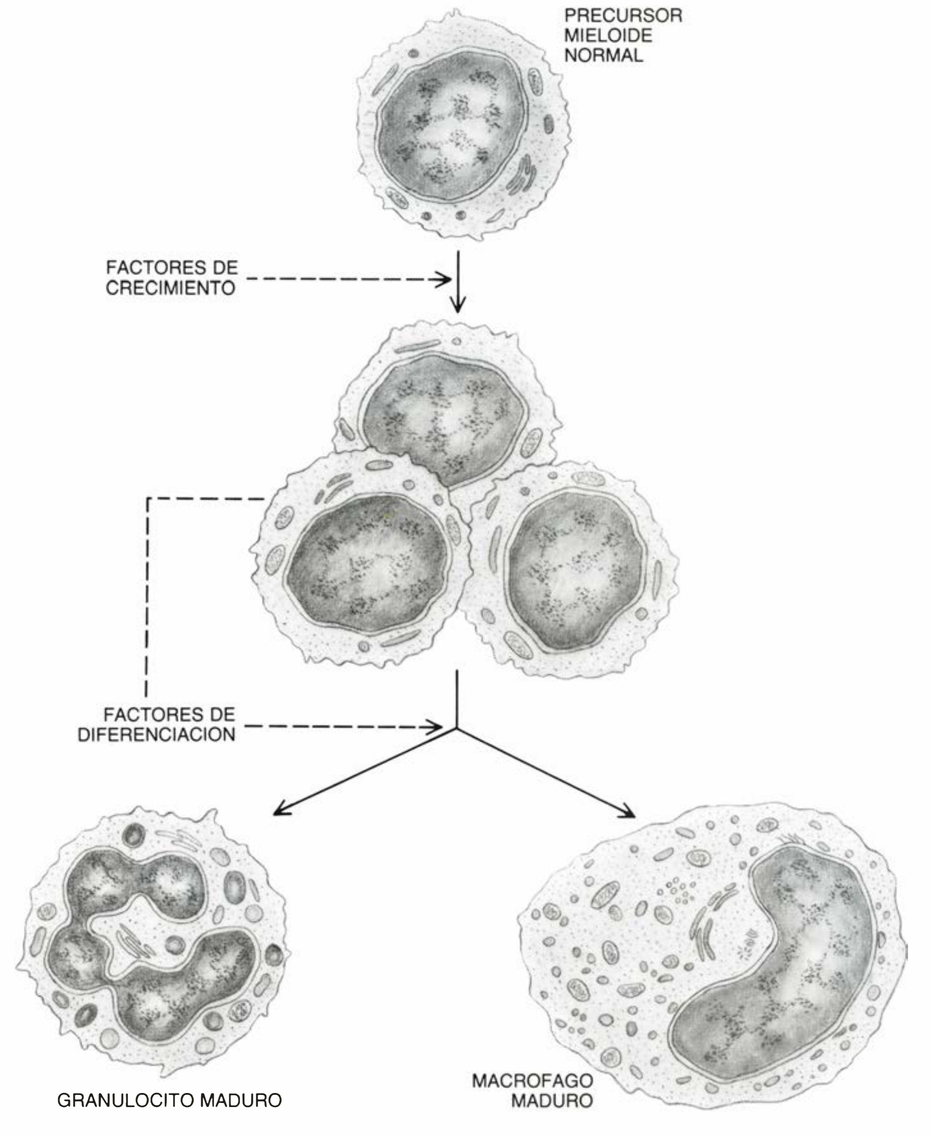
El desarrollo de un clon de macrófagos o de granulocitos maduros requiere la multiplicación de precursores mieloides, seguida de su diferenciación. Parecía plausible la idea de que cada uno de los procesos respondiera a la inducción por parte de una proteína especializada. Eitan Fibach y el autor encontraron que los granulocitos maduros secretaban, en cultivo, una proteína que inducía a las células madre mieloides a diferenciarse, si bien no las instaba a multiplicarse en clones. Seguidamente, Joseph Lotem y yo ensayamos, en líquidos recogidos de cultivos de varios tipos de células, la capacidad de inducir el crecimiento o la diferenciación en células mieloides; comprobamos que, efectivamente, los procesos los desencadenaban factores distintos. En abierto contraste con los inductores de la diferenciación, los del crecimiento no determinaban la maduración de los precursores, pero resultaban decisivos para la multiplicación celular y para la viabilidad de la célula; si faltaban, morían los precur-



1. CELULAS LEUCEMICAS MIELOIDES en diferentes estadios de desarrollo, desde una forma indiferenciada de crecimiento rápido (*arriba, a la izquierda*), hasta un granulocito maduro que no se divide (*abajo, a la derecha*). Las células precursoras mieloides normales (diversas células sanguíneas indiferenciadas e inmaduras) atraviesan esos estadios a medida que van madurando hasta convertirse en granulocitos, uno de los tipos celulares a los que pueden dar origen. Normalmente las células leucémicas no se diferencian, pero en este caso se las indujo a hacerlo: se incubaron con factor de diferenciación, una proteína elaborada por las células normales. Una vez alcanzada la forma madura, las células leucémicas dejaron de crecer y, con ello, perdieron su carácter maligno.



2. SISTEMA DE CULTIVO diseñado por el autor y sus discípulos que les permitió observar el crecimiento y diferenciación de células mieloides e identificar las moléculas reguladoras que afectan a ambos procesos. Para que las células mieloides se multiplicasen hasta producir clones y se diferenciasen en formas maduras, tanto macrófagos como granulocitos, era preciso que en el cultivo se hallara una cepa de fibroblastos, células de tejido conectivo. La purificación del medio de cultivo mostró que los fibroblastos secretan proteínas que son esenciales para el crecimiento y diferenciación de las células mieloides. (Los dibujos son de Ilil Arbel.)



3. ACOPLAMIENTO ENTRE CRECIMIENTO Y DIFERENCIACION CELULAR resultante de la interacción de proteínas reguladoras sobre las células mieloides. Los factores de crecimiento procedentes de una fuente externa (fibroblastos, por ejemplo) inducen la multiplicación de las células precursoras. Estimulan también a las células a elaborar sus propios factores de diferenciación. En última instancia, su aporte es suficiente para inducir a las células a adoptar sus formas finales. Alcanzada ésta, se detiene el crecimiento. La diferenciación celular (y el cese del crecimiento) están, por tanto, ligadas a la multiplicación celular.

sores. Otros investigadores, entre ellos Ichikawa, actualmente en el Instituto de Investigaciones de Enfermedades del Tórax de Japón, Motoo Hozumi, del Instituto Saitama de Investigaciones sobre el Cáncer, Inge L. Olsson, del Hospital de Lund, Suecia, y Robert C. Gallo, del Instituto Nacional del Cáncer de los Estados Unidos, han obtenido pruebas ulteriores de la diversa naturaleza de los factores.

Las dos clases de inductores parecen lograr sus efectos de manera distinta. Con Gary Weisinger he comprobado que el inductor de la diferenciación puede unirse directamente al ADN de una célula precursora, probablemente activando los genes que se expresan a medida que madura ésta. El inductor del crecimiento, por el contrario, no se une al ADN. Debe estimular la multiplicación de las células precursoras por algún otro procedimiento.

No cabe ya duda de que cada clase de factor comprende múltiples proteínas. Estudios realizados en mi laboratorio, y por otros investigadores en distintos lugares, por ejemplo Metcalf y Anthony Burgess, del Instituto Walter y Eliza Hall, Richard Stanley, de la Facultad de Medicina Albert Einstein, James N. Ihle, del Instituto Frederick de Investigaciones sobre el Cáncer de Maryland, y T. M. Dexter, de la Universidad Victoria de Manchester, han comprobado que, sólo a los precursores mieloides, les afectan cuatro proteínas inductoras del crecimiento diferentes. Cada una de ellas actúa sobre células mieloides que tienen un destino de desarrollo específico.

Uno de los inductores estimula el crecimiento de las células madre mieloides que luego pueden diferenciarse en una amplia gama de descendientes, así macrófagos, granulocitos, glóbulos rojos, megacariocitos (los precursores de las plaquetas) y eosinófilos y células cebadas (dos tipos celulares que participan en las reacciones inflamatorias). Otro actúa sobre células mieloides que pueden diferenciarse solamente en macrófagos y granulocitos y, el tercer y cuarto inductores del crecimiento, afectan sólo a los precursores de los macrófagos y de los granulocitos, respectivamente. Parece que los inductores del crecimiento establecen una jerarquía de especificidad: sobre las células mieloides van actuando diferentes inductores del crecimiento a medida que maduran y se va restringiendo su programa de posible desarrollo. La clonación, en varios laboratorios, del

ADN que codifica esos factores de crecimiento ha demostrado que todas las proteínas inductoras del crecimiento que actúan sobre células precursoras mieloides están codificadas por genes distintos.

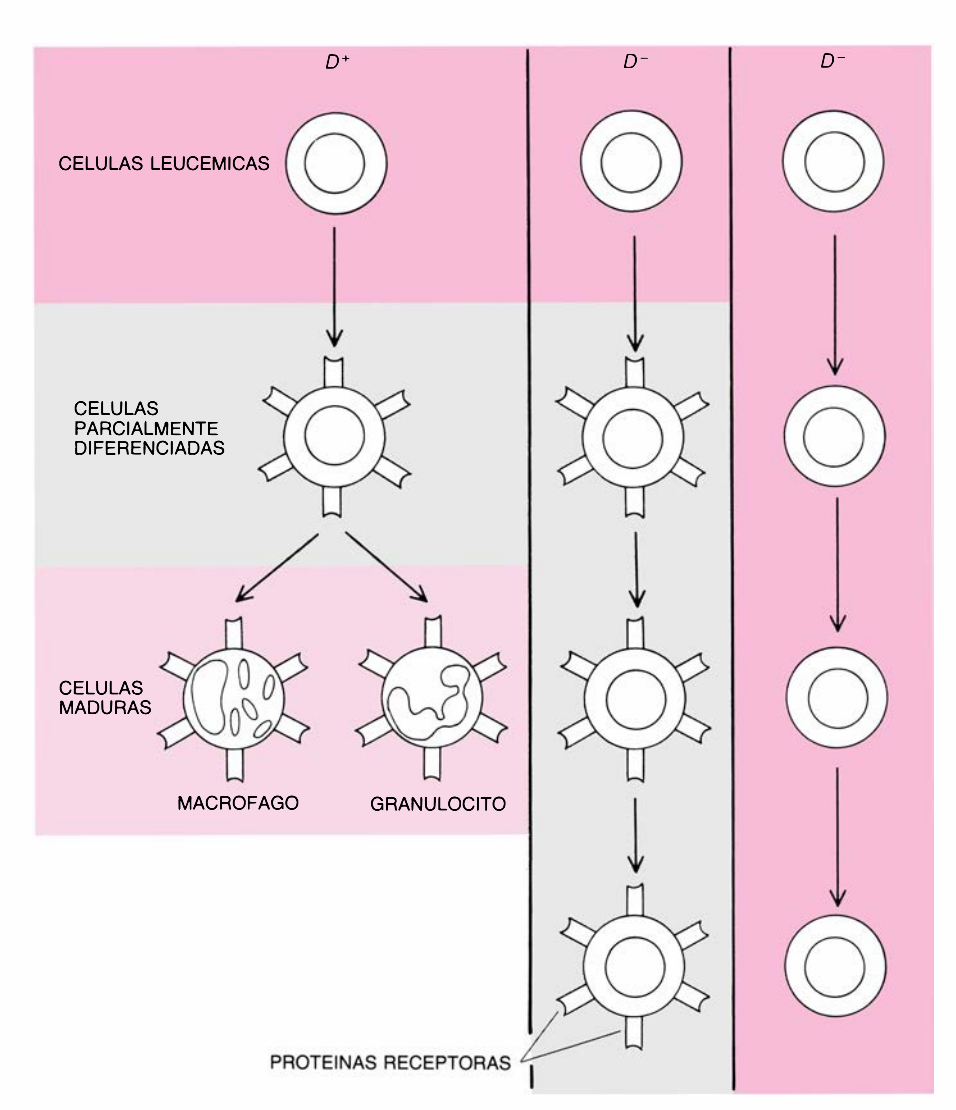
Probablemente, los propios inductores de la diferenciación son tan numerosos como los tipos de células cuya maduración estimulan. La clonación de ADN correspondiente a los inductores de la diferenciación aclarará también las relaciones que existen entre los genes que codifican esas proteínas.

Los inductores del crecimiento y la diferenciación han recibido múltiples nombres. Como término colectivo de los inductores utilicé yo en primer lugar el de *mashran gm*, derivado del hebreo bíblico *sharo*, que significa "impeler", con las iniciales correspondientes a los granulocitos y a los macrófagos. Luego se adoptaron otros, como el de "factores estimulantes de la colonia", para todas las proteínas, el de MGI-1 (inductores de macrófagos y granulocitos de tipo 1), para los factores de crecimiento, y MGI-2, para los factores de diferenciación.

En las células normales, las acciones de los inductores del crecimiento y de la diferenciación aparecen elegantemente acopladas. Loten y yo advertimos que, cuando se incubaban precursores mieloides normales junto con factor de crecimiento purificado a partir de un cultivo de otros tipos de células, los precursores se multiplicaban y luego se diferenciaban, incluso sin haber añadido el factor de diferenciación. Demostramos que la fuente del inductor de la diferenciación eran las propias células mieloides. Así pues, el factor de crecimiento ejercía dos efectos: estimulaba el crecimiento de las células precursoras y las instaba a producir el factor de diferenciación. Cuando las células precursoras se habían multiplicado hasta formar una población de tamaño suficiente, su producción conjunta de factor de diferenciación capacitábales para inducir dicha diferenciación. Sin embargo, esa relación normal entre crecimiento y diferenciación podían entorpecerla ciertos compuestos que determinaban la producción y secreción de factor de diferenciación por parte de células que no eran las propias precursoras, formándose un cortocircuito.

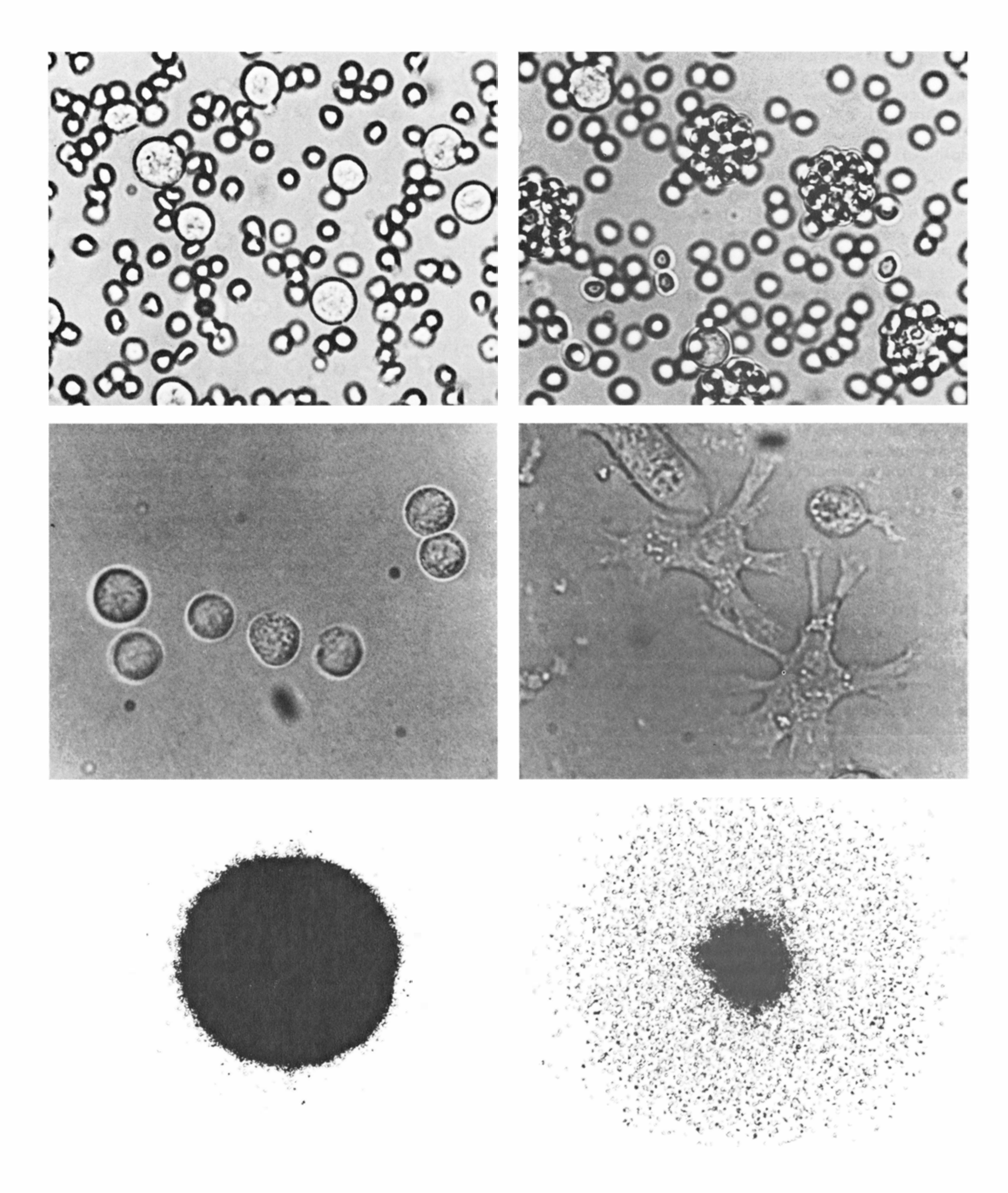
La síntesis de factor de diferenciación quizá tenga lugar en algunos precursores durante una fase más tardía del crecimiento que en otros; ello daría pie a que se formase una población de células más abundante antes de producirse la diferenciación. Quizá los factores de crecimiento específicos induzcan a las células precursoras a fabricar factores de diferenciación también específicos, desarrollándose entonces sólo algunos tipos celulares. Esa posibilidad explicaría por qué los cuatro factores de crecimiento mieloides están asociados a un conjunto diferente de células maduras; ofrece una posible alternativa a la hipótesis de que los diversos factores de crecimiento actúan en distintas etapas del desarrollo celular.

El acoplamiento normal entre crecimiento y diferenciación va acompañado, en las células de la sangre y de otros tejidos, de una segunda trabazón: la que se advierte entre la diferenciación y el cese del crecimiento. ¿Por qué las células maduras dejan de multiplicarse? En los seres humanos y en otros mamíferos los glóbulos rojos de la sangre expulsan su núcleo y pierden con ello su capacidad de dividirse. Otras células maduras conservan el núcleo y tampoco crecen; se ha sugerido que esas células diferenciadas hasta su estadio terminal producen compuestos inhibidores del crecimiento, que bloquean su propia multiplicación.



4. RESPUESTA A LOS FACTORES DE DIFERENCIACION. Varía entre los clones de células leucémicas. Algunos clones (D^+) son susceptibles de diferenciarse: la adición de factores de diferenciación aislados de cultivos de células normales insta en ellos un desarrollo normal. En primer lugar adoptan un estado intermedio de diferenciación, en el que sobre su membrana superficial se exhiben receptores de proteína característicos de las células maduras; luego toman el aspecto de macrófagos, granulocitos maduros, que no se dividen. Otros clones, los D^-, carecen de esa susceptibilidad. Sometidos a la influencia de factores de diferenciación, pueden alcanzar un estado intermedio de diferenciación en el que, a todo lo más, se enlentece su crecimiento, o no muestran respuesta alguna y siguen multiplicándose. (Otros compuestos sí lo logran.)

Las células leucémicas han escapado de las restricciones que gobiernan el crecimiento de las células mieloides normales. Una de las limitaciones del crecimiento normal es el aporte de factor de crecimiento. Los precursores



5. SEÑALES CARACTERISTICAS DE MADUREZ observadas en células leucémicas a las que se ha obligado a diferenciarse. Un procedimiento para detectar ciertos receptores de proteína de la superficie, característicos de los glóbulos blancos maduros, consiste en mezclar esas células con glóbulos rojos de oveja. Los hematíes se reúnen sobre la superficie de las células maduras formando "rosetas". Los glóbulos rojos de oveja no se agrupan sobre células leucémicas mieloides (*las células grandes que aparecen arriba, a la izquierda*) pero sí sobre células leucémicas que se han expuesto a un inductor de la diferenciación (*arriba, a la derecha*). Al disponerse las células leucémicas sobre una superficie permanecen redondas y sin fijarse a ella (*centro, a la izquierda*). Después de que un factor de diferenciación las induzca a desarrollarse las células muestran la capacidad propia de los macrófagos normales de extenderse sobre una superficie y desplazarse sobre ella (*centro, a la derecha*). Los macrófagos y los granulocitos maduros presentan quimiotaxis: se desplazan en dirección a un estímulo químico. En cambio, los clones de células leucémicas que se exponen a un estímulo químico se mantienen compactos (*abajo, a la izquierda*). Los bordes de un clon de células diferenciadas por inducción aparecen cada vez más difusos, puesto que las células emigran en respuesta al estímulo (*abajo, a la derecha*).

mieloides normales dependen de otras células para producir el factor, y el aporte puede ser esporádico. Durante una infección, por ejemplo, los fibroblastos y otros tipos de células secretan grandes cantidades del factor, para aumentar la población de glóbulos blancos, pero en otras circunstancias, el nivel de factor de crecimiento se reduce. ¿Indica el persistente crecimiento de las células leucémicas que han superado la habitual necesidad de factor de crecimiento? Para responder a ello hubo que obtener líneas clonadas de células malignas capaces de crecer en cultivo y que no estuviesen contaminadas con células normales. En mi laboratorio y en otros se han aislado varias líneas de células leucémicas mieloides de ese tipo. Su estudio puso de manifiesto que las células evaden la limitación al crecimiento impuesta de ordinario por el aporte de factor de crecimiento, y que lo hacen por dos caminos. Ciertas cepas de células leucémicas simplemente necesitan menor cantidad de factor de crecimiento que las células normales, y esa cantidad disminuye a medida que las células crecen en cultivo, hasta llegar a no precisar cantidad alguna. Otra cepa produce su propio factor de crecimiento.

Cualquiera de esas dos alteraciones dota a las células de capacidad para multiplicarse de forma persistente, y no intermitentemente, como es el caso de las células normales. Tales cambios explican también por qué las células cancerosas generan metástasis en sitios donde faltan los factores de crecimiento que sus contrapartidas normales necesitan para sobrevivir y crecer. Por el contrario, la preferencia de algunas clases de células metastásicas por determinados órganos quizás indique que aquéllas todavía requieren un pequeño aporte externo de factor de crecimiento, que sus órganos preferidos les pueden proporcionar.

Para calificar de maligna a una célula, ésta debe escapar también a una segunda restricción que limita el crecimiento de las células normales: el acoplamiento entre el crecimiento y la diferenciación, que regula el equilibrio entre células en multiplicación y células que han cesado ya de crecer. Si el factor de crecimiento inducía la producción de factor de diferenciación en las células leucémicas, las malignas que produzcan factor de crecimiento por sí mismas, o estén expuestas a él procedente de otras células, se diferenciarían y dejarían de crecer. En ese sentido, añadimos factor de crecimiento purificado a cultivos de células leucémicas que se multiplicaban sin factor de crecimiento y advertimos que no se desencadenaba la producción del factor de diferenciación. Por tanto, el desarrollo de la leucemia refleja dos conjuntos de cambios genéticos en las células precursoras mieloides: un conjunto que reduce o elimina la necesidad de la célula respecto del aporte externo de factor de crecimiento y otro que desacopla el equilibrio entre multiplicación y diferenciación celular.



6. SON DISTINTOS LOS PATRONES DE SINTESIS DE PROTEINAS que presentan las células normales, las leucémicas susceptibles de diferenciación (D^+) y las no susceptibles (D^-). Las células mieloides normales sufren una serie de cambios (*flechas*) en la síntesis de las proteínas celulares cuando quedan expuestas a factores de crecimiento y de diferenciación; emprenden la síntesis de algunas proteínas y dejan de fabricar otras. En las células leucémicas, los cambios de síntesis proteica que de ordinario induce el factor de crecimiento son constitutivos, es decir, se han producido antes de la intervención del factor (*color*). Los cambios constitutivos pueden explicar por qué las células se multiplican sin necesidad de factor de crecimiento. En las células D^+ no se han registrado los cambios de síntesis proteica desencadenados normalmente por el factor de diferenciación, de ahí que las células D^+ respondan normalmente a ese factor. En los clones D^- muchos de los cambios son constitutivos o no pueden producirse (*barras*). Los clones que se muestran resistentes al factor de diferenciación son los que exhiben mayor número de cambios constitutivos. La diferenciación normal parece requerir que todo el conjunto de cambios se produzca sincrónicamente; los cambios en las proteínas constitutivas producen asincronía e impiden que las células D^- respondan al factor.

Aunque las células leucémicas del cuerpo no suelen producir factor de diferenciación, pensamos que tal vez su aporte artificial podría instarlas a madurar y detener el crecimiento. Nuestro grupo encontró que ciertos clones de células leucémicas mieloides se diferenciaban al incubarlos con factores de diferenciación normales. Cuando a tales células se las inducía a diferenciarse, adquirían las características distintivas de los macrófagos y los granulocitos maduros. Formaban sobre sus membranas los mismos receptores de proteínas que los que muestran las células normales maduras y desarrollaban idéntica capacidad de desplazarse en la dirección de ciertos estímulos químicos. Las células leucémicas incubadas con un factor de diferenciación que induce el desarrollo de macrófagos también se tornan capaces de extenderse y reptar sobre las superficies a las que se hallan adheridas. Trabajos realizados en otros laboratorios han confirmado que, cuando se induce la diferenciación de las células leucémicas, desarrollan los rasgos de los macrófagos y de los granulocitos maduros. Tras diferenciarse, las células leucémicas adoptan otra característica de las células normales maduras: cesan de crecer.

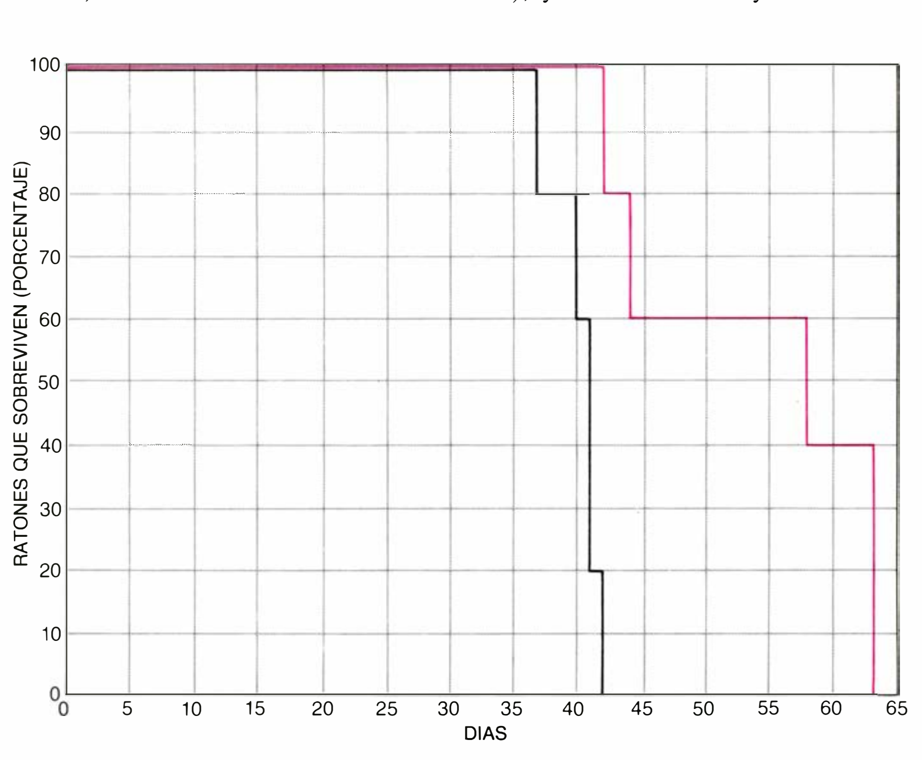
Algunas líneas de células mieloides se transforman en leucémicas al perder la habitual necesidad de factor de crecimiento, pero continúan siendo capaces de seguir la ruta normal de diferenciación hasta macrófagos o granuloci-

tos. En oposición a esos clones de diferenciación positiva (D^+), mis colegas y yo hemos aislado también clones de células leucémicas incapaces de diferenciarse (D^-). El factor de diferenciación hace que algunos de estos clones se desarrollen hasta un estadio intermedio de diferenciación en el cual la multiplicación celular sigue un ritmo más lento, mientras que en otros clones no pudo inducirse la diferenciación ni siquiera hasta esa etapa intermedia. El rasgo D^- se presenta tanto entre células leucémicas que producen su propio factor de crecimiento como entre las que no lo necesitan. He sugerido que los clones D^+ representan un estadio temprano de la malignidad y que los clones D^- corresponden a un estado más avanzado, en el que las células malignas han sufrido alteraciones más extensas de su dotación genética.

¿Acaso pierden las células leucémicas todos los genes responsables de la diferenciación a medida que se desarrollan hasta el estadio D^-? Nuestro grupo descubrió que en los clones D^+ podía inducirse la diferenciación por otros medios distintos del factor de diferenciación normal. Ciertas hormonas esteroides, pequeñas cantidades de rayos X y dosis reducidas de productos químicos que, en dosis mucho más elevadas, se aplican al tratamiento del cáncer, como el arabinósido de citosina, la adriamicina y el metotrexato, instaban la maduración de las células leucémicas. Otros compuestos que pueden inducir la diferenciación son la insulina, algunas vitaminas, el lipopolisacárido bacteriano (un componente de la pared celular de las bacterias) y ciertos compuestos fabricados por las plantas: las lectinas y algunos ésteres de forbol.

Tales compuestos, administrados por separado, en combinación o junto con el factor de diferenciación normal, inducen también la diferenciación en clones D^-, aunque hemos observado que la efectividad de un determinado compuesto varía a menudo entre unos clones y otros. Este hallazgo indica que las células leucémicas D^- conservan genes que son activos en la diferenciación normal. Es probable que una combinación adecuada de compuestos induzca la maduración y el cese del crecimiento en cualquier célula leucémica mieloide insensible al factor de diferenciación normal.

Puede también determinarse artificialmente la diferenciación de células malignas de otros linajes. Charlotte Friend, actualmente en la Facultad de Medicina Monte Sinaí, ha descubierto que el compuesto dimetil-sulfóxido hace que se diferencien las células eritroleucémicas (glóbulos rojos leucémicos), y Paul A. Marks y Richard A. Rifkind, ambos del Centro de Investigaciones sobre el Cáncer Memorial Sloan-Kettering, han encontrado que otros productos químicos ejercen ese mismo efecto. Las capas eritroleucémicas estudiadas por los investigadores no se diferenciaban en respuesta a la eritropoyetina, sustancia que normalmente induce la producción de hemoglobina (molécula característica de los glóbulos rojos maduros) en las células en vías de desarrollo. Las células leucémicas se parecían, por tanto, a nuestros clones D^- en que no respondían a un factor de diferenciación normal. Investigadores de otros centros han advertido que algunos de los compuestos que estimulan la diferenciación en células leucémicas pueden actuar del mismo modo en otras clases de cánceres, incluidos los neuroblastomas (cánceres derivados de células nerviosas) y los teratocarcinomas (cánceres constituidos por una mezcla de tejidos embrionarios).



7. SUPERVIVENCIA DE RATONES a los que se inyectó células leucémicas. Fue significativamente más larga (*color*) cuando se les administró factor de crecimiento que cuando no recibieron ese tratamiento (*negro*). Las células leucémicas procedían de clones D^+, que maduran y detienen su multiplicación en cultivo cuando se las expone a un factor de diferenciación específico. La supervivencia de los ratones tratados con factor de diferenciación, más prolongada, prueba que se inhibió el desarrollo de la leucemia en los animales.

Por nuestra parte hemos observado que las diversas sustancias capaces de inducir la diferenciación en células leucémicas mieloides actúan de distintas maneras. Algunos de los compuestos que hacen que se diferencien las células D^+ inducen la producción de factor de diferenciación normal mediante la puesta en marcha de los genes que lo codifican. Otros compuestos, así las hormonas esteroides, actúan sobre el genoma sin utilizar como intermediario al factor de diferenciación normal. En algunos clones D^- la diferenciación requiere un tratamiento combinado con varios compuestos, cada uno de los cuales pone en funcionamiento alguno de los genes necesarios para la diferenciación de la célula. Todos los compuestos, juntos, activan un juego de genes suficiente para forzar la diferenciación.

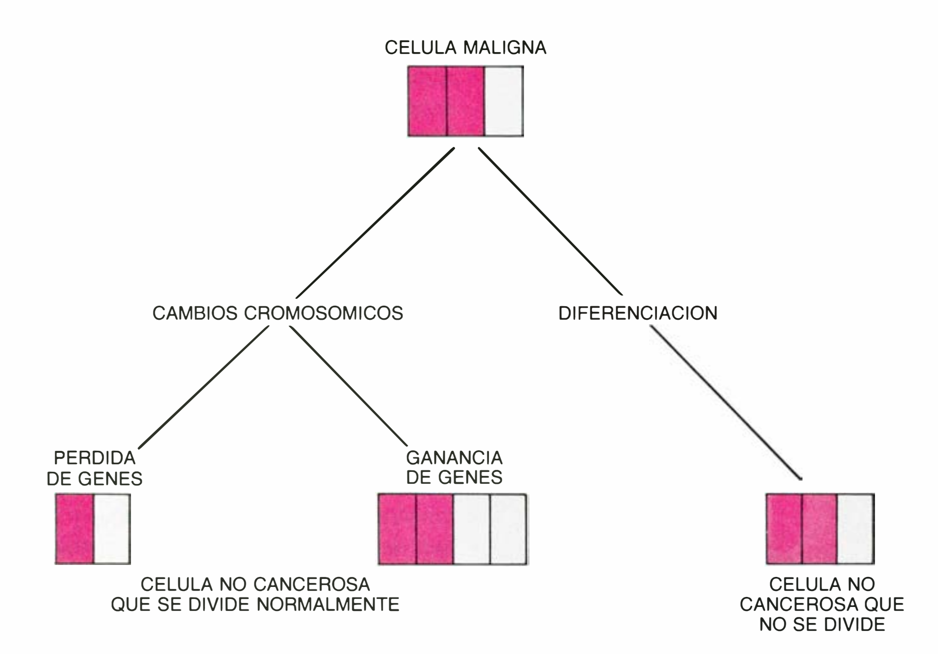
Un estudio de las proteínas celulares de células normales y leucémicas puso de manifiesto algunas de las bases genéticas de las distintas respuestas de las cepas leucémicas a las diversas sustancias que inducen la diferenciación. Dan Liebermann, Barbara Hoffmann-Liebermann y el autor utilizaron la técnica de la electroforesis bidimensional en gel para separar las proteínas celulares en función de su peso molecular y carga eléctrica. Al comparar los geles obtenidos con el material procedente de diferentes clones, o bien del mismo clon en distintas etapas de su desarrollo, y observar las diferencias en la disposición de las proteínas que se habían se-

parado, identificaron los cambios registrados en la síntesis de proteínas.

Algunas de las alteraciones mostraban una clara relación con el carácter maligno de las células leucémicas. Se encontró, por ejemplo, que en los precursores mieloides normales el factor de crecimiento inducía la síntesis de muchas proteínas y detenía la de otras. En las células leucémicas, sin embargo, esos cambios de dotación proteica no precisaban inducción: los geles mostraban que las células ya habían sufrido los cambios de síntesis proteica. Para las células leucémicas, los cambios de proteínas eran "constitutivos". Probablemente las células leucémicas no tuvieran necesidad de factor de crecimiento de procedencia externa porque los genes a los que normalmente afecta ya se habían puesto en funcionamiento o se habían detenido.

Nuestro grupo identificó también algunos de los cambios de juegos de proteínas inducidos en células normales por el factor de diferenciación. Las células leucémicas D^{+}, como las normales, sólo mostraban cambios de proteicos después de haberlas expuesto al factor de diferenciación: se requería la acción inductora. Sin embargo, muchos de los cambios de la síntesis proteica eran constitutivos en los clones D^{-}. Cuanto más resistente era un clon a la inducción de la diferenciación por su factor normal, mayor era el número de cambios de carácer constitutivo que presentaban las células.

Nuestros resultados sugieren que el proceso normal de diferenciación requiere la expresión sincrónica de un conjunto de genes; las interacciones mutuas de las proteínas codificadas por los genes probablemente resulten fundamentales para la diferenciación. Cuando la expresión de un gen es constitutiva, y no inducida, falla la necesaria coordinación de la expresión génica. La asincronía puede bloquear el programa de diferenciación normal, creándose una célula que nunca llega a diferenciarse por completo y que, por ello, no cesa de multiplicarse. Geoffrey Symonds y el autor encontraron que ciertos sueros instaban la revisión de algunos cambios de las proteínas constitutivas característicos de las células leucémicas D^{-}, de tal forma que su expresión exigía entonces una inducción previa. Después del tratamiento con estos sueros, las células respondían, madurando, a la influencia del factor de diferenciación normal. Habíamos desbloqueado el programa genético de diferenciación.



8. REMISION DE LA MALIGNIDAD. Se logra por dos caminos distintos. Las células adquieren el carácter canceroso a raíz de ciertos cambios genéticos que alteran el equilibrio normal existente entre los genes que provocan la malignidad (*color*), generalmente denominados oncogenes, y los que suprimen la expresión de los oncogenes (*gris*). Se ha observado que, en cultivo, las células malignas vuelven a crecer con normalidad si sus cromosomas se alteran de tal modo que se restaure el equilibrio entre oncogenes y sus supresores (*izquierda*). Por el contrario, la detención de la malignidad a través de la diferenciación celular elude los cambios genéticos (*derecha*). La dotación genética de una célula cancerosa sigue siendo anormal pero, después de diferenciarse, la célula adopta una forma madura, deja de dividirse y pierde su carácter maligno.

El hallazgo de que varios compuestos pueden estimular la maduración de las células D^{-} a pesar de los cambios en sus proteínas constitutivas, que las dotan de resistencia al factor de diferenciación normal, indica que existen varios programas genéticos para seguir esa vía de desarrollo. Lydia Cohen y yo nos valimos de la electroforesis bidimensional en gel para examinar las proteínas celulares de dos clases de células leucémicas mieloides: las que se diferenciaban en respuesta al factor de diferenciación normal, pero no a la hormona esteroide dexametasona, y aquellas que respondían a la dexametasona pero no al factor de diferenciación. Los clones mostraron distintos juegos de cambios de proteínas constitutivas. Parece, por tanto, que el factor de diferenciación normal y otros inductores de la diferenciación activan distintos conjuntos de genes, aunque el efecto neto de los genes –la maduración de la célula– sea el mismo. Es probable que las células de otros cánceres puedan también seguir diversas rutas genéticas de diferenciación.

Mis colegas y yo hemos comprobado que ninguna de las células de nuestros clones leucémicos mieloides presentaban una dotación normal de cromosomas. Entre las anormalidades observadas figuraban cambios del número de cromosomas y reordenamientos y deleciones de segmentos cromosómicos. Advertimos diferencias persistentes entre los clones que respondían al factor de diferenciación y los que no. Los cambios cromosómicos observados en las células leucémicas probablemente sean responsables de los trastornos genéticos que afectan al control del crecimiento celular y la diferenciación que imprime a esas células la malignidad.

Una posible vía para lograr la remisión de la malignidad consiste en restaurar los cromosomas de las células cancerosas de modo que adopten un patrón más normal. En 1968, Zelig Rabinowitz y el autor demostraron que al cultivar en ciertas condiciones clones de células de sarcoma (células malignas que surgen en el tejido conectivo) aparecían a menudo células que habían remitido al estado no maligno. En sarcomas que Carmia Borek y yo indujimos en fibroblastos normales cultivados, valiéndonos de carcinógenos químicos o rayos X, las células que remitían mostraban una duración de la vida correspondiente a la de los fibroblastos normales. Presentaban también una composición cromosómica diferente de la de sus progenitores malignos, más parecida a la de los cromosomas de las células normales.

Los cromosomas cuya alteración re-

sultaba decisiva para la remisión de las células malignas poseían los que, en aquel momento, denominé genes *E* (genes de expresión de la malignidad) y genes *S* (genes de supresión de la malignidad). Los cambios cromosómicos que se traducían en un cese de la influencia de los genes *S* sobre los *E* producían cáncer; los que restablecían el equilibrio conducían a la remisión. Luego se aislaron genes *E* en varios laboratorios, denominándoseles oncogenes; los genes *S* bien podrían bautizarse soncogenes, o anti-oncogenes.

Nos preguntamos si se registra una restauración similar de la dotación cromosómica cuando se diferencian y dejan de crecer las células leucémicas. ¿Se corrigen las anormalidades genéticas o acaso la remisión de la malignidad por diferenciación da un rodeo para esquivar los cambios genéticos que en su momento confirieron malignidad a las células? En ese sentido examinamos los cromosomas de células leucémicas mieloides a las que se había obligado a diferenciarse y encontramos que su composición cromosómica seguía siendo anormal. Parece que la detención de la multiplicación que comporta la diferenciación inducida permite eludir los trastornos genéticos que originalmente alteraron la secuencia normal de crecimiento y diferenciación.

El hallazgo de que la malignidad puede remitir obligando a las células cancerosas a diferenciarse y dejar de crecer abre nuevas perspectivas terapéuticas. Quizás algún día figure la corrección de los propios trastornos genéticos que causan cáncer entre los métodos de tratamiento de ese mal. Puede ya someterse a prueba el valor terapéutico de esquivar los cambios genéticos por inducción de la diferenciación celular. Mi grupo del Instituto Weizmann ha demostrado que el desarrollo de una leucemia en ratones a los que se inyecta células leucémicas D^{+} es más lento cuando se les administra factor de diferenciación o un compuesto que incremente su síntesis por parte de las células normales del cuerpo. Puede que se logren efectos semejantes en seres humanos, lo cual ofrecería una alternativa a las drogas citotóxicas hoy en uso en la quimioterapia del cáncer que, además de las células cancerosas, matan muchas células normales.

Otra aplicación terapéutica consistiría en administrar inductores de macrófagos y de granulocitos normales (es decir, factores de crecimiento y de diferenciación) a pacientes que, por otros cánceres, estuviesen sometidos a quimioterapia convencional. Los factores sostendrían las poblaciones de macrófagos y granulocitos que se resienten de la quimioterapia. También podrían administrarse ambos factores para aliviar los déficits no malignos de macrófagos y granulocitos. Parecido uso clínico podría dársele a los factores que actúan sobre otros tipos celulares.

El tratamiento de leucemias en las que las células, como nuestros clones D^{-}, ya no responden al factor de diferenciación normal podría beneficiarse de otras sustancias capaces de inducir la diferenciación. Tales compuestos ya se utilizan, en elevadas dosis, en la quimioterapia del cáncer. Nuestro trabajo sugiere que su eficacia probablemente no sólo responda a que matan las células, sino a que inducen la diferenciación, bien sea directamente o bien estimulando a las células malignas a producir factores de diferenciación. Las diferencias en la respuesta de los pacientes a la quimioterapia podría reflejar la distinta susceptibilidad de las células malignas a los compuestos que inducen la diferenciación.

En la terapia de la leucemia por diferenciación cabría utilizar las mismas sustancias, pero a dosis mucho más bajas, tal vez en combinación con factor de diferenciación normal. Algunas de las sustancias se administrarían a pequeñas dosis para inducir la diferenciación, mientras que otras se darían en cantidades superiores, puesto que sus efectos citotóxicos reducirían el número total de células leucémicas. Para elegir la mejor combinación de compuestos y procedimientos antes del tratamiento se someterían a ensayo in vitro las células leucémicas extraídas del paciente, lo cual informaría de su susceptibilidad a las distintas sustancias.

Mis sugerencias han llevado ya a varios investigadores a abordar pruebas clínicas con inductores de la diferenciación en pacientes de leucemia mieloide. Laurent Degos, del Hospital de San Luis de París, se cuenta entre quienes han obtenido resultados alentadores tras el empleo de pequeñas dosis de arabinósido de citosina, uno de los productos químicos con los que indujimos in vitro la diferenciación de las células leucémicas mieloides. Es de esperar que los hallazgos obtenidos con células mieloides lleguen a generalizarse a otros tipos celulares cuyo crecimiento y diferenciación estén controlados por nuevos factores específicos. De ser ello así, quizá la remisión de la malignidad por diferenciación celular inducida figure algún día entre los tratamientos de muchos tipos de cáncer.



Estructura de la cola de los cometas

Las colas de plasma se forman y se separan de los cometas en respuesta al viento solar y a su campo magnético. La observación de los cometas Giacobini-Zinner y Halley puede ayudar a aclarar tales fenómenos

John C. Brandt y Malcolm B. Niedner, Jr.

Los años 1985 y 1986 serán considerados algún día como la edad de oro de la astronomía cometaria. Nadie duda, además, de que si se nos hubiera dejado escoger dos años en los que dedicarnos con ahínco a nuestra especialidad astronómica, la elección habría optado decididamente por ese bienio. Dos cometas importantes, Giacobini-Zinner y Halley, se han acercado en su órbita alrededor del Sol hasta entrar en el campo de observación. Giacobini-Zinner ha suministrado ya una gran riqueza de información, merced a su condición de ser el primer cometa en recibir la visita de un vehículo espacial; y, por lo que respecta a Halley, los astrónomos han desplegado un conjunto sin precedentes de recursos para examinarlo. Se están recogiendo datos en observatorios de la Tierra, por vehículos espaciales en órbita alrededor de ella, por vehículos lanzados al espacio y en órbita alrededor de otros planetas y por seis naves que se acercarán o penetrarán en la atmósfera del cometa.

Por una afortunada coincidencia, Giacobini-Zinner y Halley –que se encuentran entre los pocos cometas periódicos dotados de brillo suficiente y que, al mismo tiempo, tienen casi completo su conjunto de características cometarias– han quedado sometidos a investigación minuciosa virtualmente al mismo tiempo. Los astrónomos compararán descubrimientos obtenidos, mediante técnicas de observación semejantes, en dos cometas que difieren bastante. Los impresionantes esfuerzos puestos en juego para estudiar Giacobini-Zinner y Halley prometen aportar pruebas directas de las teorías acerca del origen, composición y dinámica de los cometas y sus colas. Se espera también que susciten nuevos interrogantes.

El vehículo *International Cometary Explorer* (Explorador Cometario Internacional, ICE), de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio de los Estados Unidos (NASA), atravesó la cola de Giacobini-Zinner el 11 de septiembre de 1985 y proporcionó un aluvión de datos que todavía se está examinando. Sondas de la Agencia Espacial Europea, del Japón y de la URSS se dirigirán a Halley este mes, transmitirán valiosas mediciones relativas a la estructura, composición y condiciones físicas de las atmósferas cometarias y suministrarán igualmente las primeras imágenes de un núcleo cometario. Las misiones serán apoyadas por redes de observación basadas en tierra y la tripulación del transbordador espacial de la misión Astro 1 de la NASA realizará observaciones simultáneas.

Los proyectos actuales continúan una rica historia de observación de cometas que se ha venido prolongando a lo largo de los siglos. La palabra "cometa" proviene del léxico astronómico de los griegos de la antigüedad, quienes dieron a esos visitantes solares el nombre de "aster kometes", estrellas de cabello largo. Se sabe hoy que los cometas constan de tres partes principales: atmósfera, cola y núcleo. La parte visual de la atmósfera se suele llamar cabeza o cabellera; es una nube de gas y polvo más o menos esférica. El diámetro de la atmósfera varía entre menos de 1000 kilómetros y algunos millones de kilómetros, en razón de la clase de gas. Una o más colas, que se dirigen hacia el lado opuesto al Sol, se extienden detrás de la atmósfera. Hay dos tipos principales de colas: colas de polvo y colas de plasma.

Las colas del primer tipo están formadas por partículas de polvo de tamaño micrométrico arrastradas desde la cabellera por fuerzas de presión debidas a la luz solar, al incidir ésta sobre los granos de polvo. Las colas de polvo son curvas y borrosas y, en general, apenas muestran estructura interna, si es que muestran alguna. Las colas de plasma, absolutamente diferentes de las anteriores, están formadas por moléculas que se han ionizado en la atmósfera, debido a la radiación solar, han quedado aprisionadas en los campos electromagnéticos interplanetarios generados por el Sol y se han arrollado en torno al cometa; los iones originan así una larga estructura ahorquillada que, frecuentemente, presenta formaciones filamentosas, nudos y perturbaciones de gran escala. Los gases de la cabellera y de la cola muestran fluorescencia, es decir, absorben radiación solar y la reemiten.

Según un modelo generalmente aceptado, propuesto por Fred L. Whipple en 1950, la fuente de toda la materia cometaria es el núcleo, que está dentro de la atmósfera; en razón de su tamaño diminuto, nunca puede observarse a través del telescopio. Whipple comparó el núcleo con una bola de nieve sucia: está formado por hielos de agua y de otras moléculas. Hay granos de polvo, y posiblemente materia ro-

1. EL COMETA WEST, fotografiado el 9 de marzo de 1976, se caracterizaba por dos tipos de cola cometaria. La cola de polvo es la más ancha y difusa, situada a la izquierda y formada por tres anchas bandas con débiles emisiones entre ellas. Está constituida por partículas sólidas que han sido expulsadas de la atmósfera del cometa por la fuerza de presión debida a la radiación solar incidente sobre los granos de polvo. La cola de plasma es la más estrecha, situada a la derecha y formada por un intrincado tejido de serpentinas. Está constituida por moléculas que han quedado atrapadas en las líneas de fuerza de los campos magnéticos interplanetarios (transportados por las partículas del viento solar) que se han arrollado alrededor del cometa.



2. EL COMETA GIACOBINI-ZINNER visto en una imagen electrónica obtenida por Uwe Fink, de la Universidad de Arizona; para ello se sirvió de un dispositivo acoplado en carga, en el Laboratorio Planetario y Lunar de Tucson. Se realizó el 26 de julio de 1985. Una extensa atmósfera rodea al cometa, algo alargado en dirección opuesta al Sol. No se ve cola de plasma, quizá porque la exposición resultó corta.

cosa, repartidos con mayor o menor uniformidad por toda la matriz helada. Suele aceptarse que el núcleo es esferoidal y mide varios kilómetros de diámetro. ¿Cómo puede un objeto tan pequeño crear colas de plasma que alcanzan 50 millones de kilómetros de longitud?

La respuesta reside en la dinámica de los materiales que el núcleo suelta en el espacio interplanetario. Cuando un cometa se acerca al Sol, el núcleo absorbe luz solar y se calienta hasta alcanzar la temperatura de sublimación de los hielos, es decir, pasa directamente de la fase sólida a la gaseosa. Los gases que escapan abandonan el núcleo a una velocidad inicial de algunas décimas de kilómetro por segundo; mientras se mueven hacia fuera, experimentan muchas reacciones químicas. Además, las moléculas de gas que escapan chocan con granos de polvo recién liberados y los impulsan hacia fuera. A través del proceso de fotodisociación, muchas moléculas gaseosas absorben fotones ultravioleta de la luz solar y ganan energía cinética a medida que se dividen en moléculas menores. Esta conversión de la luz solar en energía cinética, junto con la presión del gas más denso, que empuja a esas moléculas hacia fuera, las acelera hasta velocidades que, en promedio, son de un kilómetro por segundo. La mezcla de polvo y gas se expande, convirtiéndose en la atmósfera cometaria, cuya expansión prosigue al tiempo que se alimenta con la nueva materia que, constantemente, escapa del núcleo.

Tras su abandono del núcleo, los gases experimentan una complicada serie de transformaciones de las que resultan nuevas moléculas; una reciente simulación con ordenador de esas actividades incluía más de 1200 procesos y reacciones. Los gases que escapan pueden reaccionar también con las partículas que rodean el cometa al acelerarse alejándose del Sol. En cierta clase de reacción, llamada intercambio de cargas, un protón captura un electrón de una molécula o átomo de gas cometario para crear un átomo de hidrógeno neutro y un ion cargado positivamente. Los gases que escapan sufren otras alteraciones producidas en reacciones entre moléculas neutras e iones, en las cuales intercambian la carga. Las diversas reacciones que modifican los gases originales del núcleo generan una concentración de iones en la cabellera que se convertirá en los componentes gaseosos de la cola de plasma.

El conocimiento de la formación y estructura de la cola de plasma avanzó notablemente con la introducción de la fotografía a finales del siglo XIX. Las primeras fotografías de alta calidad de cometas fueron probablemente las obtenidas por Sir David Gill, en 1882; pero la técnica no se empleó de una manera regular hasta que apareció el cometa Swift, un decenio más tarde. Edward Emerson Barnard, quien trabajaba con un equipo muy sencillo (una cámara de foco fijo), fue uno de los pioneros del uso generalizado de la fotografía. A él se debe la primera observación de la extremada complicación de las colas de plasma: con estructuras entrelazadas en forma de rayos y flámulas, frecuentemente acompañadas de nudos, condensaciones y estructuras helicoidales. En las distintas fotografías que obtuvo en noches despejadas, observó que algunas partes del plasma se movían a alta velocidad. Las fotografías tomadas en noches sucesivas no se parecían, en general, entre sí, tales eran los cambios aparecidos en la cola. Aunque Barnard no conocía la composición detallada de las colas que observó, logró distinguirlas de las colas de cambio más lento, las que hoy conocemos por colas de polvo.

Los estudios de Barnard condujeron a la mayor revelación de esos primeros años de la fotografía cometaria: la cola de plasma se separa y se aleja en el espacio, para ser reemplazada por otra nueva. En un trabajo de 1905 que llevaba por título "Las colas anómalas de cometas", Barnard describió este desconcertante fenómeno cíclico y recomendó que se hicieran frecuentes fotografías a lo largo de la noche. Sostenía que "el intervalo que media de un día a otro es demasiado grande en la historia de un cometa y los cambios no guardan una relación necesaria entre sí. Es la historia de hora en hora la que debe estudiarse para comprender los cambios que están sucediéndose en el cometa. En el caso de un cometa muy brillante, las fotografías deberían hacerse en intervalos de media hora durante tanto tiempo y tan continuadamente cuanto las condiciones lo permitieran. De esta manera será posible determinar los movimientos exactos de las partículas en las colas de diversos cometas". Barnard conjeturó de esos estudios que las discontinuidades se producían por interacciones con "corrientes en el espacio interplanetario que atraviesen las colas".

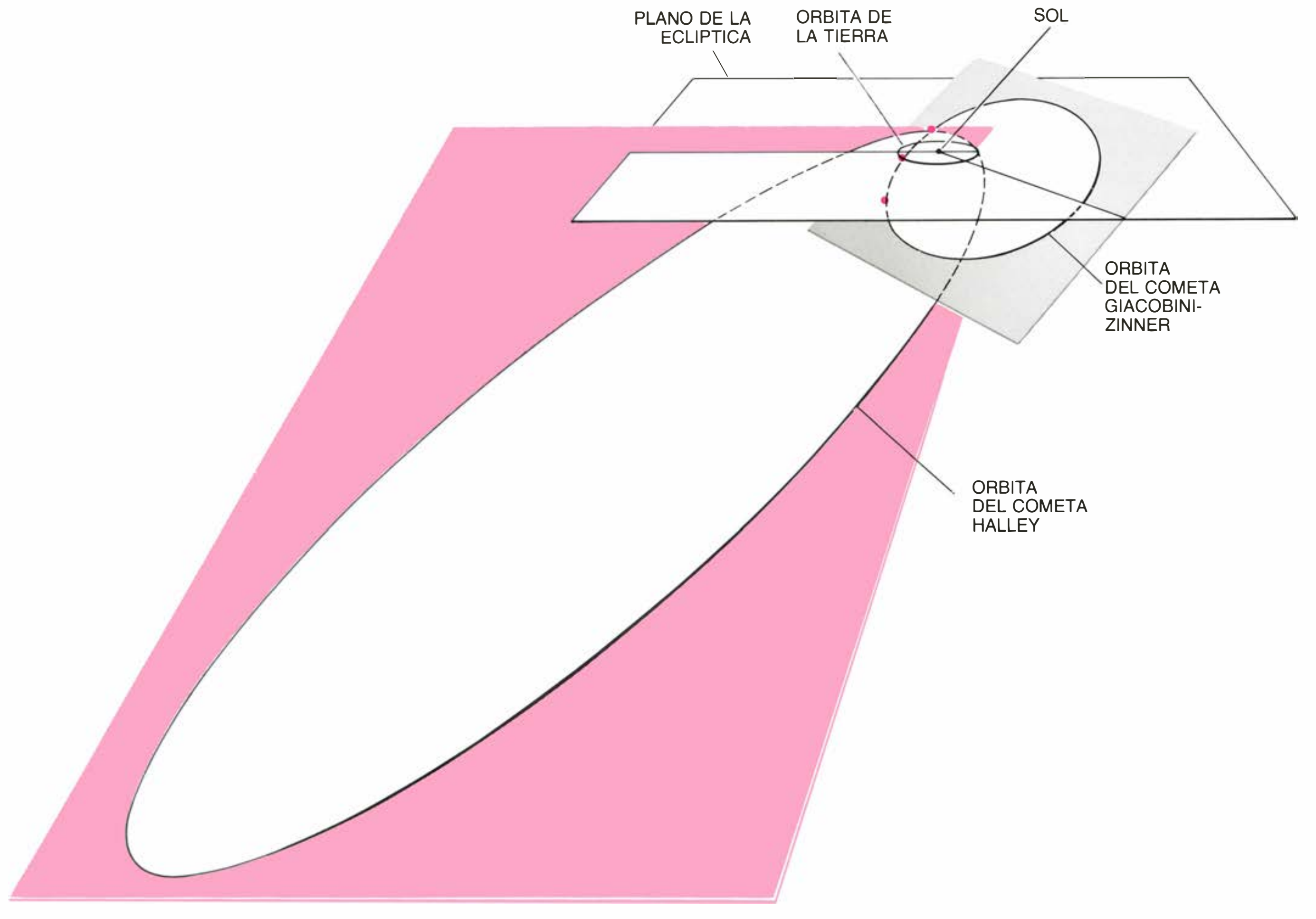
No se avanzó mucho desde el trabajo precursor de Barnard hasta 1951. En ese año, Ludwig Biermann comenzaba a poner de manifiesto la naturaleza de las corrientes analizando el movi-

miento y aceleraciones de las estructuras observadas en las colas cometarias de plasma. Calculó que la presión de la luz solar no era, ni con mucho, suficiente para explicar la intensidad de la fuerza que empujaba la cola hacia la parte opuesta al Sol. Biermann razonó que alguna forma de "radiación corpuscular", emitida continuamente por el Sol, debía chocar con los iones cometarios para formar la cola y producir las grandes aceleraciones observadas.

El siguiente paso fue determinar la naturaleza de esas supuestas partículas solares y explicar cómo dan cuenta de la intrincada morfología de la cola de plasma. Se sabía que el hidrógeno y el helio se ionizan en la corona (la tenue parte externa de la atmósfera solar) y que los protones y electrones resultantes escapan del Sol en virtud de las altas temperaturas solares. E. N. Parker, de la Universidad de Chicago, estableció que dichos átomos deben acelerarse al abandonar la gravitación solar y viajar por el espacio interplanetario. Acuñó el término "viento solar" para designar el movimiento dinámico de la radiación al atravesar el sistema solar. En 1957, un año antes de que se publicase el histórico trabajo de Parker, Hannes Alfvén, del Real Instituto de Tecnología de Estocolmo, lanzó la idea de que esa radiación corpuscular transportaría, probablemente, el campo magnético solar hasta el espacio. Su trabajo mostró que el campo magnético del viento solar acoplaba el plasma del viento con los iones cometarios para formar colas de plasma. El modelo de "tubo de flujo magnético" de Alfvén merece hoy la aceptación general. El trabajo de los autores y las observaciones de los cometas Giacobini-Zinner y Halley continúan aclarando y perfilando la teoría.

El punto esencial de la teoría es el violento choque entre el viento solar y los gases de la atmósfera del cometa. El viento solar y su campo magnético fluyen hacia el cometa a velocidades de unos 400 kilómetros por segundo. En contraste con el plasma del viento solar que se aleja del Sol, los recién creados iones cometarios avanzan hacia el Sol tal vez a un kilómetro por segundo. Algunas nociones básicas de electricidad y magnetismo ayudan a predecir qué ocurrirá cuando ambos gases colisionen. Que las partículas cargadas no puedan moverse libremente a través de un campo magnético, sino que describan trayectorias helicoidales alrededor de sus líneas de fuerza, constituye un dato de interés. Cuando los iones de las regiones exteriores de la atmósfera (a 500.000 kilómetros o más del núcleo) se depositan en el viento solar, son "capturados" por las líneas de fuerza magnética del viento solar y, consiguientemente, se mueven de nuevo hacia el cometa, en la misma dirección que el viento solar.

Este último, que ha experimentado un aumento en su masa al recibir los iones cometarios, debe retardarse para conservar la cantidad de movimiento. El proceso de deceleración continúa a medida que van capturándose más iones durante el movimiento del viento solar hacia la atmósfera interna. Con el tiempo, se alcanza un punto en que se han atrapado tantos iones, y se ha decelerado tanto el movimiento, que las presiones hacia fuera de los iones y otros gases más cercanos al núcleo se compensan con las presiones hacia den-



3. GIACOBINI-ZINNER y HALLEY son cometas periódicos, que visitan el sistema solar interior en el curso de sus órbitas regulares alrededor del Sol; ambos están dotados de brillo suficiente y poseen características que facilitan su estudio. Halley es observable desde la Tierra una vez cada 76 años; Giacobini-Zinner se acerca a nuestro planeta cada 6,5 años. Los puntos en color de las tres órbitas indican la posición de los dos cometas y la Tierra el 15 de enero.

DIRECCION DE MOVIMIENTO DEL COMETA

COLA

BARRERA MAGNETICA

CABELLERA

NUCLEO

AL SOL

LINEAS DE FUERZA DEL CAMPO MAGNETICO

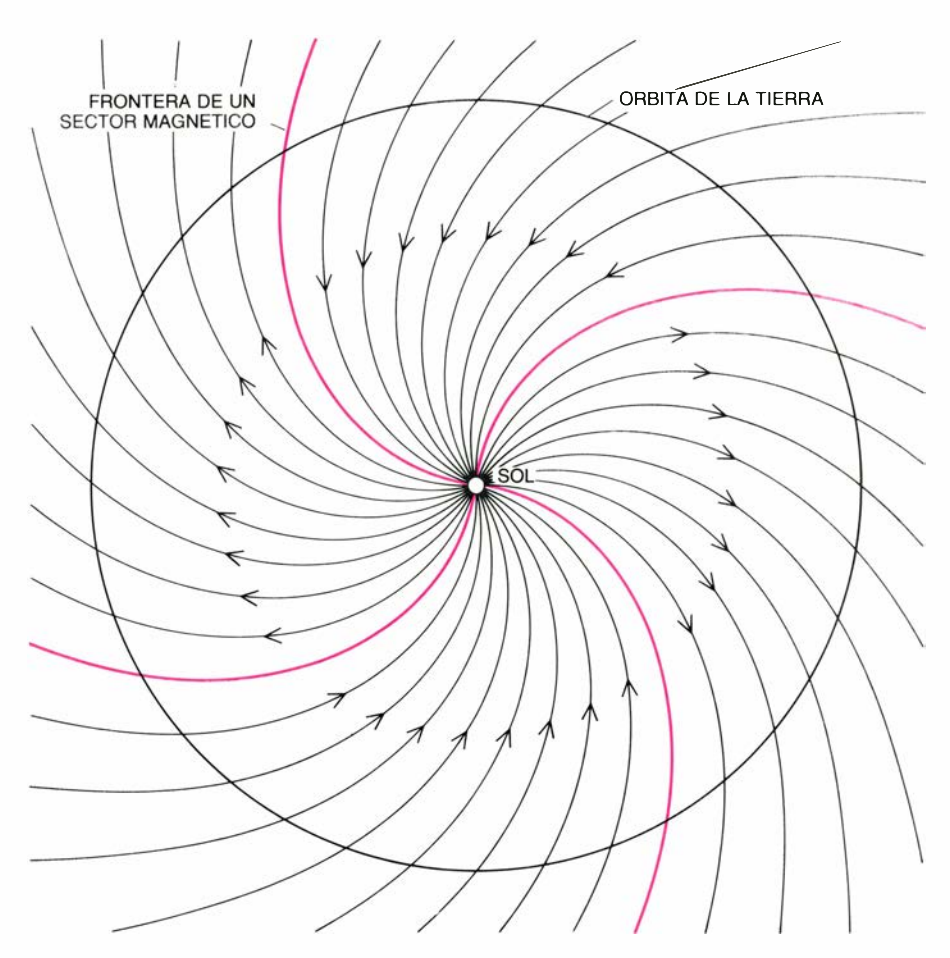
4. LINEAS DE FUERZA del campo magnético del viento solar incidente; se comprimen en la atmósfera del planeta, cuyos iones quedan capturados por dichas líneas cuando el viento solar sopla a través de la atmósfera cometaria. La compresión tiene su causa en la creciente masa del viento solar al ir capturando iones; la conservación de la cantidad de movimiento obliga a la corriente a perder velocidad. A cierta profundidad de la atmósfera, donde la concentración de iones capturados se ha elevado, la presión de los iones que empuja hacia fuera iguala a la dirigida hacia dentro causada por el viento solar. Este equilibrio impide que el plasma del viento solar y las líneas de fuerza que transporta más se ahonden en la atmósfera; así se crea una región libre de campo magnético en el cometa. Por los lados, las líneas del campo se curvan alrededor y detrás del cometa. Estas líneas arrastran iones de la atmósfera junto con el viento solar.



5. IONES DE LA COLA DEL COMETA: son canalizados por las líneas de fuerza del campo magnético al arrollarse éste en torno al cometa. Una lámina de corriente eléctrica (*flecha vertical*) y un campo magnético de baja intensidad separan los lóbulos de polaridad opuesta del campo magnético de la cola. Cuando el viento solar supersónico ha capturado una masa suficiente de iones cometarios, sufre entonces una deceleración brusca en su camino a través del "arco de choque", que es análogo a la onda de choque producida por un avión supersónico o al surco abierto por una embarcación en su avance por el agua.

tro ejercidas por el viento solar que transporta los iones capturados. En ese momento se detiene la corriente de viento solar; se dice que se estanca. Los campos magnéticos que transporta, comprimidos sin solución de continuidad, forman una barrera magnética que está igualmente en reposo. Esto acontece muy adentrados ya en la atmósfera; en el caso de un cometa brillante, pensemos en Halley, puede ocurrir a distancias entre 1000 y 10.000 kilómetros del núcleo.

Por ser el cometa un obstáculo para el viento solar, se forma un "arco de choque" a distancias entre 50.000 y 100.000 kilómetros del núcleo. Recuerda la onda de choque producida por un buque en su travesía. Lejos del cometa y a sus lados, se captura un menor número de iones y, en consecuencia, el viento solar no sufre ningún impedimento apreciable. Los campos magnéticos de esas zonas, que están ligados a los campos de la barrera, se arrollan por detrás del cometa, formando dos lóbulos de polaridad opuesta. Esta cola magnética puede observarse porque canaliza iones cometarios fluorescentes, tales como los de monóxido de carbono y los de vapor de agua.

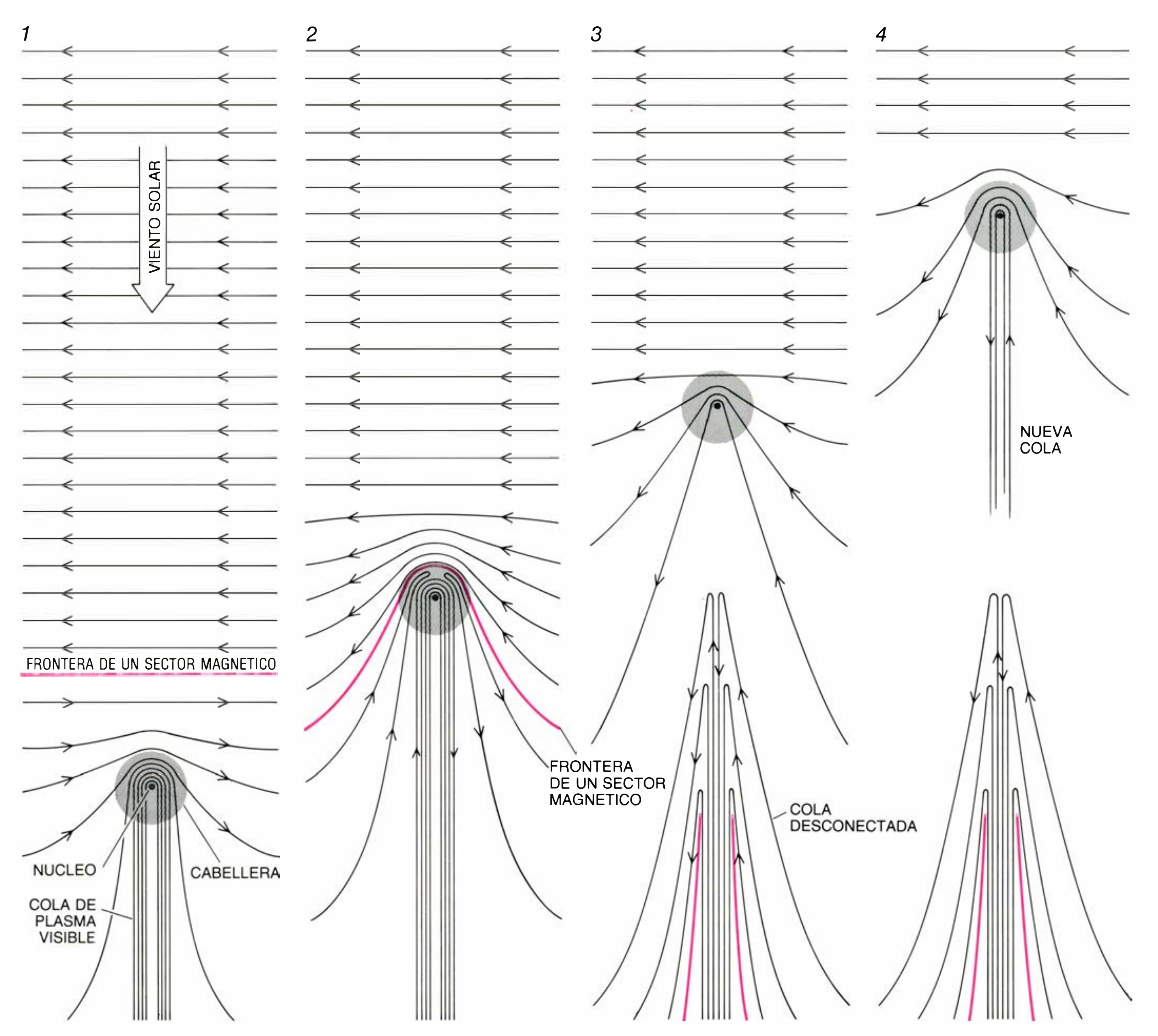


6. FORMA ESPIRAL del campo magnético del viento solar (vista por encima del plano de la órbita terrestre) que resulta de la rotación solar mientras emite el plasma que transporta el campo. En cada rotación suelen observarse cuatro "sectores del campo". Los sectores sucesivos irán presentando polaridad opuesta.

El campo magnético inmerso en el viento solar también interacciona periódicamente con el campo magnético de la cola del cometa, produciendo la clase de separación que Barnard observó. El estudio de los autores acerca del cometa Kohoutek, en 1973-1974, sacó a la luz el desarrollo de ese proceso. El cometa fue copiosamente fotografiado en el Observatorio Conjunto para la Investigación Cometaria de Socorro, Nuevo México. Sus imágenes revelaron una gran riqueza de detalles estructurales en la cola de plasma. Las fotografías realizadas en una noche mostraban que la cola se extendía hasta cierta distancia de la cabeza, desaparecía y, después, parecía comenzar de nuevo. Estudiamos cuidadosamente los escritos de Barnard sobre lo que ahora se llaman desconexiones o discontinuidades, ya que pretendíamos determinar si las fotografías de Kohoutek mostraban realmente una propiedad de los cometas o si, por el contrario, estábamos interpretando incorrectamente débiles imágenes de la fotografía. Las fotografías prestaron el apoyo que necesitábamos para considerar propiedades generales de los cometas los sucesos de desconexión.

Volvimos entonces a los datos del cometa Kohoutek con el propósito de comprender por qué se producían las desconexiones aun cuando las líneas de fuerza del campo magnético carecían de principio y de fin. El satélite Octava Plataforma Interplanetaria de Observación midió el plasma del viento solar y el campo magnético en la vecindad de la Tierra. Trasladando esos datos a la posición de Kohoutek, descubrimos la posible causa de las desconexiones. Kouhoutek perdía su cola cuando atravesaba la frontera de un sector magnético: el límite entre sectores de polaridad opuesta del campo magnético. Llegamos así a la conclusión de que, probablemente, se producía una desconexión de la cola cada vez que un cometa pasaba de un sector magnético a otro. Abundan las ocasiones para que los cometas pierdan sus colas: durante el período de rotación del Sol, de 25 días, forma cuatro sectores magnéticos de polaridades alternadas que se extienden constantemente a medida que giran con el Sol. Cuando se detectan los sectores en el plano de la órbita terrestre, aparecen en forma de cuatro espirales arremolinadas.

Según nuestro modelo, un cometa pierde su cola cuando cruza la frontera de un sector porque el nuevo sector contiene un campo magnético opuesto al campo en que se formó la cola. Desde el punto de vista de la física de plasmas, la oposición de los dos campos crea una situación que difícilmente podría ser más inestable. El resultado es un proceso que recibe varias denominaciones: reconexión magnética, fusión magnética o aniquilación magnética. Aunque no se conocen bien los pormenores teóricos del fenómeno, pese a varios decenios de estudio, suele aceptarse que la topología del campo magnético en la atmósfera cometaria cambia de manera radical. Cuando las antiguas líneas de fuerza magnética del cometa entran en contacto con las líneas del campo magnético del nuevo sector, las antiguas se cortan y se sueldan a la configuración de líneas de campo del nuevo sector. Cuando las líneas del campo del cometa se cortan así, la materia que contienen queda aprisionada en las antiguas líneas de fuerza, mientras que el cometa continúa moviéndose en el seno del nuevo



7. SE SEPARA LA COLA DE PLASMA cuando el cometa cruza la frontera entre dos sectores, moviéndose de un sector en el que el campo magnético posee la misma polaridad que la cola a otro donde la polaridad del campo es opuesta. Cuando el nuevo campo penetra en la cabellera y se comprime contra los antiguos campos opuestos que trenzan la cola, las antiguas líneas de fuerza quedan cortadas por un proceso conocido como reconexión magnética. Las líneas de fuerza antiguas retienen los iones que han capturado, pero ya no están unidas al cometa. Cuando todos los antiguos campos magnéticos han sido expulsados de la atmósfera, los iones recién formados en ella carecen de conexión magnética con la cola de plasma. La cola parece separarse de la cabellera. La atmósfera suministra inmediatamente iones para formar una nueva cola cuya polaridad será del nuevo sector del campo magnético. (Esquema de George V. Kelvin.)

campo magnético. La cola parece despegarse en cuanto la última parte de la materia inmersa en las líneas antiguas se aleja del cometa. Completado el proceso de desconexión, el cometa empieza inmediatamente a crear una nueva cola de plasma cuya polaridad corresponde a la del nuevo sector magnético.

Exige nuestro modelo que se produzcan sucesos de desconexión cada vez que el cometa atraviesa los límites de un sector, es decir, aproximadamente cada semana; para ello, se apoya en las altas correlaciones observadas entre los sucesos de desconexión y los cruces de límites de los sectores magnéticos. Hemos hallado también concordancias entre los cambios morfológicos registrados durante un suceso de desconexión y los que el modelo predice. Se han propuesto otros mecanismos para dar cuenta de los sucesos de desconexión, pero la explicación más viable parece ser la basada en la interrupción y reconexión de las líneas de campo magnético en el límite de un sector.

Este modelo de los sucesos de desconexión presenta ciertos puntos débiles, aunque básicos, que deberían resolverse mediante la observación extensa e intensa del Halley. El primer punto flaco es que dicho modelo macroscópico de la morfología de los sucesos de desconexión y de la evolución de las colas de plasma se resiente de la escasez de datos. El cuadro se ha construido utilizando observaciones de diferentes cometas y analizando datos de diversos observatorios que emplean gran variedad de instrumentos, emulsiones y tiempos de exposición. Cabe esperar que la Red de Fenómenos en Gran Escala de la Vigilancia Internacional del Halley ayudará a formar un archivo documentado de la visita del cometa. La red consta aproximadamente de 100 instalaciones en torno a nuestro globo, cada una equipada con

instrumentos fotográficos de gran campo que deben registrar una fracción importante del plasma y de las colas de polvo. Estos observatorios siguen al Halley, desde su paso a través del hemisferio Norte de la esfera celeste en su fase de acercamiento, hasta su retorno al sistema solar exterior a través del hemisferio Sur, esta primavera.

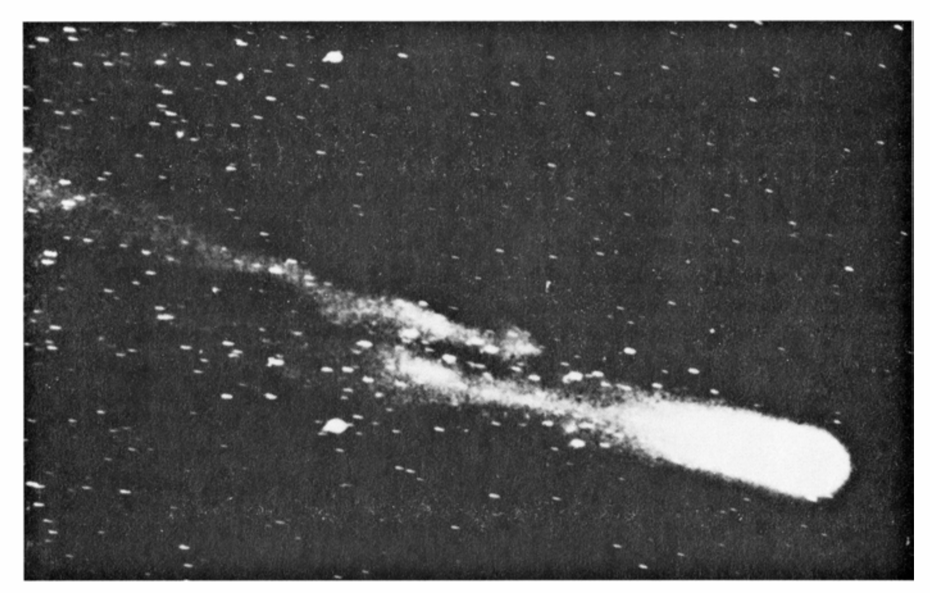
Para lograr largos períodos de frecuente cobertura, se requiere buen tiempo y una distribución regular de observatorios en ambos hemisferios de la Tierra. En el meridional, en gran parte cubierto por océanos, se han establecido cuatro redes de islas: dos en el Pacífico, una en el Atlántico y otra en el Indico. En esos puntos se instalarán telescopios portátiles para rellenar lo que, sin ello, sería una cobertura precaria mientras el cometa avanza a través del hemisferio Sur en este mes de marzo y en abril próximo.

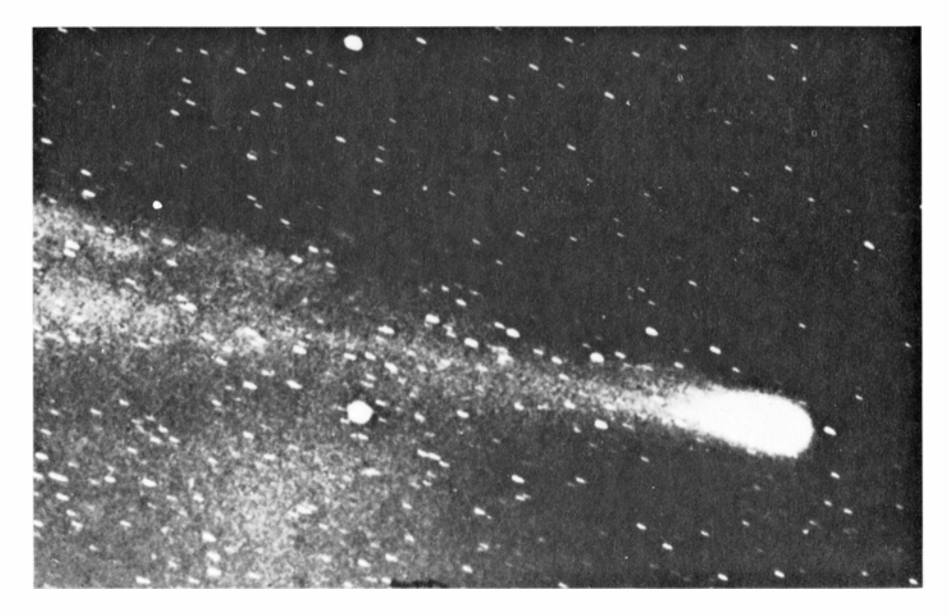
Las colas de polvo y de plasma del Halley deben dejarse observar. Las colas apuntarán aproximadamente en la misma dirección durante el viaje del cometa hacia el Sol; cuando se aleje del mismo, las colas deben estar separadas por un gran ángulo. Hay muchas razones para esperar que las longitudes de cola observadas en 1910, impresionantes, se repitan, o sean quizás algo más cortas debido, esta vez, a que la trayectoria apunta más directamente hacia la Tierra y está a mayor distancia de ella. El análisis de las fotografías realizadas en 1910 sugiere que la cola de Halley alcanzó longitudes de varias décimas de unidad astronómica. (Una décima de unidad astronómica equivale a 15 millones de kilómetros.) Como resultado de factores geométricos y de proyección altamente favorables, las longitudes angulares de las colas llegaron a alcanzar, en 1910, 50 grados. En 1985-86, estas longitudes aparentes se encuentran en el margen de 10 a 15 grados.

A la cobertura de la Red de Fenómenos en Gran Escala habrá que agregar las fotografías del cometa tomadas con las cámaras de gran campo de que dispondrá la misión Astro 1 del transbordador espacial. Durante una semana de este mes de marzo, las cámaras obtendrán imágenes cada seis horas. Registrarán también el cometa cada hora y media durante intervalos de un día, al acercarse al Halley dos vehículos espaciales, el soviético *Vega-2* y el *Giotto*, de la Agencia Espacial Europea.

Del segundo punto débil del modelo –la insuficiencia de datos sobre las con-







8. DESCONEXION de la cola del Halley, fotografiada durante su última visita, en 1910. Las desconexiones fueron notadas por Edward Emerson Barnard, quien supuso correctamente, en 1899, que las producía alguna interacción con el medio interplanetario. Propuso fotografiar los cometas frecuentemente, para seguir así tales variaciones. Este suceso de desconexión se reconstruyó con fotografías obtenidas el 6 de junio de 1910, en el Observatorio de Yerkes (*arriba*) y en Honolulú (*centro*), y el 7 de junio en Beirut (*abajo*).

	GIACOBINI-ZINNER	HALLEY				
	NASA	URSS		AGENCIA ESPACIAL EUROPEA	JAPON	
VEHICULO	ICE	*VEGA-1*	*VEGA-2*	*GIOTTO*	*SAKIGAKE*	*SUISEI*
FECHA DE LANZAMIENTO	AGOSTO DE 1978 (DICIEMBRE DE 1983)	DICIEMBRE DE 1984	DICIEMBRE DE 1984	JULIO DE 1985	ENERO DE 1985	
FECHA DE ENCUENTRO	11 SEPTIEMBRE DE 1985	6 MARZO DE 1986	9 MARZO DE 1986	13 MARZO DE 1986	8 MARZO DE 1986	
DISTANCIA AL NUCLEO (EN KILOMETROS)	8.000 (EN DIRECCION A LA COLA)	10.000 (EN DIRECCION AL SOL)	3.000 (EN DIRECCION AL SOL)	500 (EN DIRECCION AL SOL)	4×10^6 (EN DIRECCION AL SOL)	2×10^5 (EN DIRECCION AL SOL)
VELOCIDAD DE PASO (EN KILOMETROS POR SEGUNDO)	21	80	77	69	74	75
DISTANCIA AL SOL (EN KILOMETROS)	$1{,}55 \times 10^8$	$1{,}185 \times 10^8$	$1{,}245 \times 10^8$	$1{,}335 \times 10^8$	$1{,}215 \times 10^8$	$1{,}20 \times 10^8$
DISTANCIA A LA TIERRA (EN KILOMETROS)	$7{,}05 \times 10^7$	$1{,}74 \times 10^8$	$1{,}635 \times 10^8$	$1{,}470 \times 10^8$	$1{,}665 \times 10^8$	$1{,}71 \times 10^8$
EXPERIMENTOS COMETARIOS	8	13	13	10	3	1

9. ENCUENTROS DE VEHICULOS ESPACIALES con dos importantes cometas, relacionados en la tabla superior. El encuentro con el Giacobini-Zinner aportó datos valiosos sobre la estructura de las colas de los cometas, pues el *Explorador Cometario Internacional* (ICE), de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), atravesó la cola de plasma el 11 de septiembre del año pasado. (El ICE fue puesto en órbita entre la Tierra y el Sol en agosto de 1978, y fue reorientado, en diciembre de 1983, para su encuentro con el cometa Giacobini-Zinner.) Las misiones que interceptarán al cometa Halley, este mes de marzo, deben proporcionar un mayor conocimiento de las propiedades de las colas de los cometas al traer información del lado situado hacia el Sol.



10. EL GRAN COMETA DE 1843 dominó los cielos septentrionales. En esta litografía se ha representado tal como se vio, sobre la noche de París, el 19 de marzo de ese año. El cometa, tal vez el más brillante de los últimos dos siglos, no se ha vuelto a ver desde su aparición en 1843. La longitud de la cola era de unos 300 millones de kilómetros, es decir, más larga que la distancia del Sol a la órbita de Marte. El artista representó una brillante cola que corresponde, probablemente, a la variedad de polvo. Aunque debió existir otra de plasma, estaba inmersa en la cola de polvo y era demasiado débil para dejarse ver.

diciones microscópicas del plasma cometario y de los campos magnéticos de la cola– se están ocupando seis vehículos espaciales. Uno, el ICE, ya ha realizado un encuentro con éxito con Giacobini-Zinner. Los otros cinco pasarán junto a Halley este mes; el ICE realizará un seguimiento por detrás. Antes de estas misiones no ha habido medidas "in situ" de ninguna variable cometaria; no se han obtenido valores fidedignos ni del campo magnético, ni de la temperatura ni de la densidad y velocidades globales de plasmas cometarios. Los datos de esas variables son necesarios para determinar los procesos relevantes y la rapidez con que pueden esperarse cambios en el cometa.

La primera de las misiones, ICE, atravesó la cola de plasma de Giacobini-Zinner, a unos 8000 kilómetros del núcleo, el 11 de septiembre de 1985. Aportó importantes datos sobre la forma del campo magnético capturado, la cola de dos lóbulos y el flujo de corriente eléctrica en ella, características todas que figuran en el modelo de Alfvén de 1957. El ICE midió una sorprendente cantidad de turbulencia al llegar a la región del arco de la onda de choque. La misión produjo también dos sorpresas notables: no se observaron todos los signos de onda de choque que se esperaban y dos experimentos detectaron iones inesperados de alta energía. Apoyándose en las observaciones de la onda de choque, algunos investigadores han pensado que el plasma del cometa podría, bajo ciertas condiciones, decelerar suavemente el viento solar, y no de forma brusca según preveía el modelo clásico. El estudio detallado de los datos de la misión ICE debe ayudar a explicar estos descubrimientos y algunos otros.

Al proyectar el viaje de los vehículos espaciales con destino al Halley se ha tenido en cuenta el máximo ahorro de energía. Apuntar al cometa cuando está atravesando la órbita terrestre significa aprovechar la cantidad de movimiento de la Tierra en su órbita, la cual transfiere impulso al vehículo espacial y aumenta de modo efectivo la energía de éste durante el lanzamiento. La más atrevida de esas misiones será la que llevará a cabo el *Giotto*, que atravesará una gran concentración de polvo cometario mientras dure su paso a 500 kilómetros del núcleo. La superficie anterior del *Giotto* está protegida por un doble escudo. El primero de ellos fragmentará y decelerará las partículas incidentes; el segundo habrá de impedir la penetración de las partículas hasta el cuerpo principal del vehículo.

Para pasar próximo al núcleo, el *Giotto* necesitará datos sobre la posición de éste. La URSS proporcionará la información en virtud del acuerdo Pathfinder (explorador). Las cámaras instaladas a bordo de las sondas soviéticas *Vega-1* y *Vega-2* registrarán la posición del núcleo, que será retransmitida bajo los auspicios del Grupo Consultivo Interagencias, integrado por las cuatro organizaciones responsables de los vuelos y la Vigilancia Internacional del Halley. El *Vega-1* pasará a menos de 10.000 kilómetros del núcleo; el *Vega-2* quizá pueda pasar aún más cerca. De las misiones *Vega* y *Giotto* se esperan las primeras fotografías del núcleo de un cometa. Las sondas japonesas *Sakigake* y *Suisei* suministrarán información adicional acerca del Halley, al mismo tiempo que quedarán a distancia suficiente para evitar el riesgo de residuos cometarios. El *Sakigake* vigilará el viento solar que incide sobre el cometa desde una posición de alrededor de un millón de kilómetros o más, corriente arriba del cometa. El *Suisei* penetrará en la atmósfera del cometa a 200.000 kilómetros de distancia y obtendrá datos sobre la densidad y velocidad del plasma. Sacará también imágenes ultravioleta de la atmósfera cometaria.

Los enormes esfuerzos desplegados para el seguimiento del Halley y el Giacobini-Zinner deben hacer progresar espectacularmente nuestros conocimientos de física cometaria, pero quedarán por responder muchas cuestiones, entre ellas las que surjan de los nuevos datos. Las misiones de exploración directa proporcionan información basada en series de fotografías instantáneas tomadas a lo largo de trayectorias únicas. Se necesitarán datos globales que registren los cambios de esos objetos a lo largo del tiempo para profundizar en nuestro conocimiento de las colas cometarias. A las dos misiones de la NASA "Encuentro con cometas" y "Volando a través de los asteroides", planeadas para principios de los años noventa, corresponde proporcionar tan importante información. Se espera que el vehículo se acerque al cometa Wild II en 1995 y registre valiosos datos mientras viaja con el cometa, a lo largo de su órbita, durante unos dos años y medio. Si la misión tiene éxito, señalará el próximo paso lógico en nuestro afán por explorar y comprender la naturaleza de los cometas.

Ciencia y sociedad

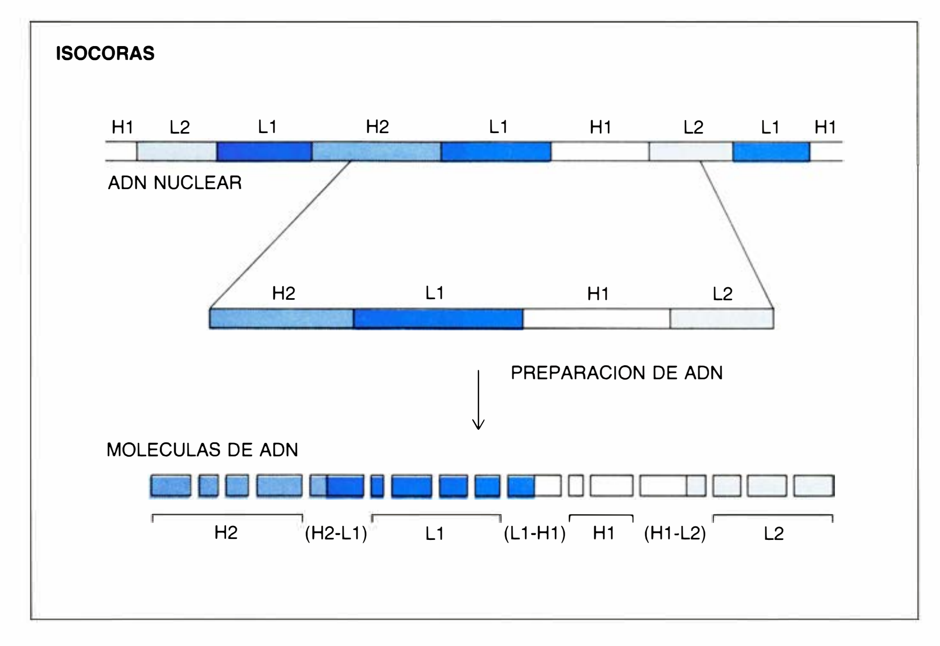
Compartimentalización del genoma en los vertebrados

Conocemos ya bastante bien la organización genómica y la regulación de la expresión génica en los procariotas, organismos unicelulares sin núcleo diferenciado. Por contra, y a pesar de los esfuerzos realizados en muchos laboratorios durante los últimos años, quedan abiertas un buen número de cuestiones de crucial importancia para la comprensión de ambas en el dominio eucariota.

En su mayor parte, la investigación que se lleva a cabo sobre el genoma eucariota está centrada en el estudio de genes individuales o familias de ellos; déjanse sin abordar las secuencias no codificadoras, a pesar de su abundancia característica en el genoma eucariota. Este planteamiento, si bien puede permitirnos ahondar en la regulación de la expresión génica, no parece que nos vaya a desvelar la organización del genoma eucariota. Se exige, para ello, una aproximación global.

Hasta ahora, el método general más ampliamente utilizado para estudiar la organización de las secuencias genómicas insistía en la cinética de reasociación exhibida por fragmentos de ADN desnaturalizados. En este sentido, R. J. Britten y D. E. Kohne, de la Institución Carnegie de Washington, demostraron, en 1968, que los genomas eucariotas, en contraste con los procariotas, contenían, además de secuencias únicas (secuencias presentes una vez o un número muy pequeño de veces por genoma haploide), secuencias poco, mediana y altamente repetidas (secuencias que mostraban cierto grado de homología y reiteradas un buen número de veces por genoma haploide).

Del mismo modo, se ha podido reconocer la existencia de dos patrones principales de dispersión de secuencias repetidas. En el primero, descubierto en *Xenopus* por E. H. Davidson y colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, en 1973, algo más de la mitad de las secuencias únicas están intercaladas con secuencias repetidas cortas formando un período breve de dispersión; el resto de las secuencias únicas se intercala con secuencias repetidas en un período de dispersión largo. El segundo patrón de dispersión de secuencias repetidas, el patrón de *Drosophila*, fue descrito por J. E. Manning y colaboradores, del Instituto de Tecnología de California, en 1975, y consiste únicamente en un período de dispersión largo. Al primer patrón se le otorgó carácter universal, mientras que el segundo se consideró poco frecuente.



Durante la preparación del ADN en el laboratorio, las isocoras se fragmentan y se origina una mezcla de moléculas de ADN más o menos largas que contienen parte de una o dos isocoras. Estas moléculas pueden separarse unas de otras y agruparse, en función de su contenido en GC, en distintos componentes que pueden ser utilizados para estudiar la distribución genómica de cualquier secuencia para la cual se disponga de una sonda.

En los últimos años, en el laboratorio de G. Bernardi, del Instituto J. Monod de París, se ha desarrollado otro método global para estudiar la organización de las secuencias moleculares del genoma eucariota. El método en cuestión se basa en el fraccionamiento del ADN nuclear nativo mediante centrifugación en gradiente de densidad de C_2SO_4, en presencia de ligandos de ADN tales como Ag^+ o bis(acetatomercurimetil)dioxano (BAMD).

En un artículo publicado el pasado verano en la revista *Science*, G. Bernardi y sus colaboradores proponíamos un modelo de organización del genoma nuclear de los vertebrados de sangre caliente en el que la mayoría de dicho genoma sería un mosaico de segmentos muy largos de ADN (por encima de las 200 kilobases). Estos segmentos, denominados isocoras, son bastante homogéneos por lo que a las bases componentes se refiere; parecen ser, además, los responsables de las bandas cromosómicas "giemsa" y "reversa" y pueden pertenecer a cuatro o cinco grandes clases diferentes, según su contenido en guanina-citosina (GC), denominadas L1, L2, H1, H2 y H3. Las isocoras no contribuyen del mismo modo a la composición del mosaico: las menos ricas en GC, L1 y L2, que son las más abundantes, representan un poco más de la mitad del genoma; por contra, las clases de isocoras más ricas en GC, H2 y H3, constituyen, aproximadamente, tan sólo el 12 por ciento del genoma.

El estudio de la distribución de distintas secuencias a través de las diferentes clases de isocoras que componen el genoma nuclear de los vertebrados de sangre caliente ha permitido a G. Bernardi y colaboradores obtener unos resultados que pueden ser importantes a la hora de comprender no sólo la organización de las secuencias genómicas y la regulación de la expresión génica, sino también los procesos de diferenciación celular y evolución.

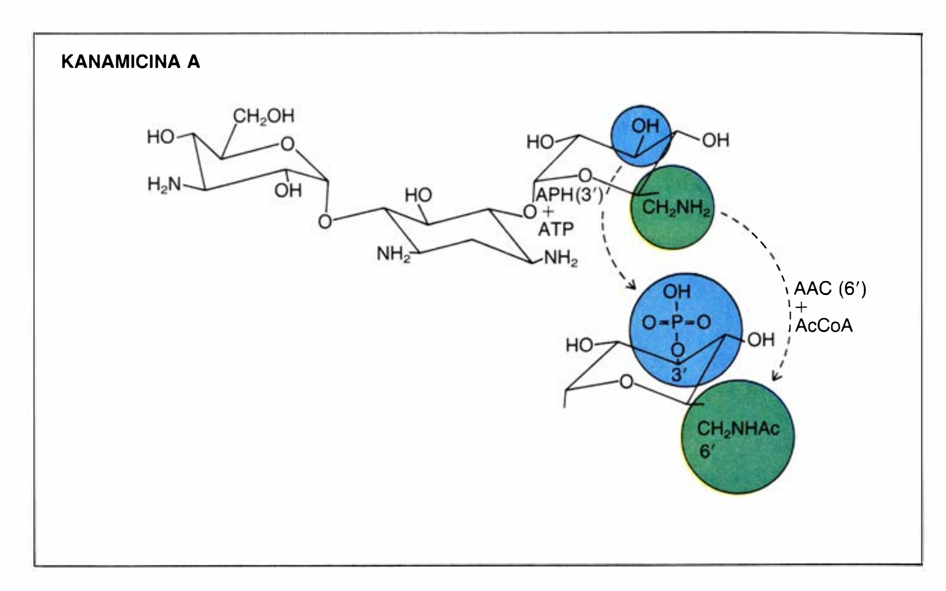
El estudio de la distribución genómica de 34 genes, tres secuencias víricas integradas y una familia de secuencias repetidas y dispersas indica que esta distribución no es uniforme: la mitad de las secuencias analizadas se encuentran localizadas en las isocoras menos representativas del genoma nuclear

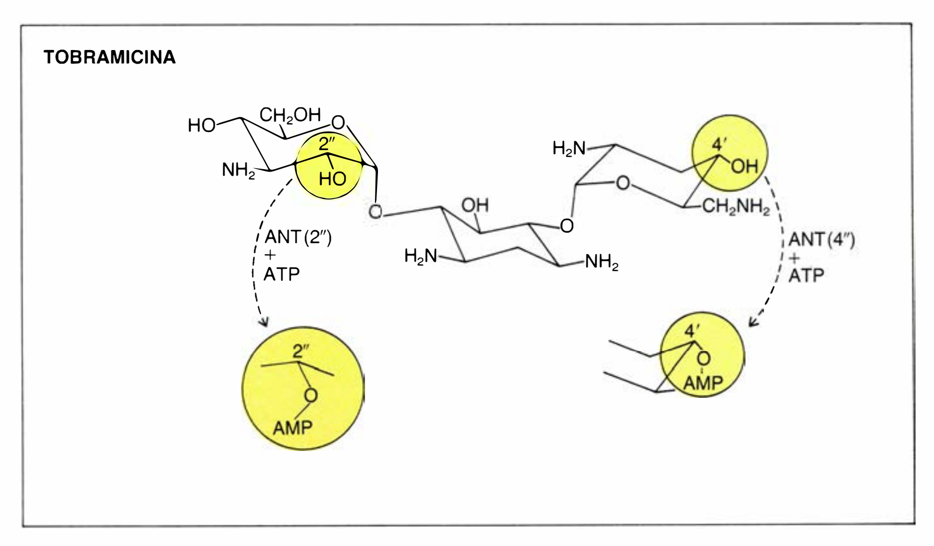
de los vertebrados de sangre caliente (H2, H3). La distribución de secuencias génicas y secuencias repetidas parece, además, conservarse durante la evolución.

Por otra parte, existe una relación entre la composición en bases de las secuencias génicas y la de las isocoras en que estas secuencias están localizadas: la composición de los genes, y también la de los exones e intrones por separado, depende de forma lineal y directa de la composición en bases de las isocoras donde dichos genes estén localizados. (Cuanto mayor sea el contenido en GC de una isocora, mayor será el contenido en GC de los genes en ella localizados.) Esto comporta que la utilización del código genético no dependa de la composición en aminoácidos de la proteína determinada por un gen, sino del contenido en GC de la isocora donde ese gen esté localizado. El contenido de dobletes CpG en los exones depende también, lineal y directamente, de la localización de los genes en las isocoras. Este hecho, al ser los dobletes CpG zonas con alta frecuencia de mutación, puede revestir enorme interés desde un punto de vista evolutivo. Las familias de secuencias repetidas dispersas y las secuencias víricas integradas tampoco están distribuidas al azar en el genoma nuclear de los vertebrados de sangre caliente, sino que están localizadas en isocoras cuyo contenido en GC es igual o muy parecido al suyo propio.

La compartimentalización composicional u organización en mosaico no es, sin embargo, exclusiva del genoma nuclear de los vertebrados de sangre caliente. Los vertebrados de sangre fría presentan, asimismo, un genoma nuclear compartimentalizado en su composición, si bien, a diferencia del genoma de los vertebrados de sangre caliente, aquél apenas contiene isocoras ricas en GC. Bernardi y colaboradores han recabado pruebas que demuestran la existencia de dos mecanismos evolutivos diferentes, responsables del alto contenido en isocoras ricas en GC que caracteriza al genoma de los vertebrados de sangre caliente: multiplicación (amplificación) de secuencias ricas en GC ya existentes e incrementos regionales en nucleótidos GC en secuencias ricas en AT ya existentes.

Mientras que el primer proceso implica la ocurrencia de duplicaciones e inserciones, el segundo proceso, más importante cuantitativamente, lleva consigo la ocurrencia de mutaciones puntuales. Ignoramos qué provocó los incrementos regionales en nucleótidos GC; sin embargo, el hecho de que dichos incrementos hayan afectado de igual manera a las secuencias codificadoras y a las secuencias no codificadoras induce a pensar que las causas determinantes tendrían un origen estructural y estarían relacionadas con la necesidad de estabilizar las estructuras cromosómicas, de cara a las temperaturas relativamente elevadas de las células de los vertebrados de sangre caliente. (Julio Salinas.)





Ejemplos de los tres mecanismos bioquímicos de modificación de aminociclitoles tomando como substratos kanamicina A y tobramicina (3′-desoxikanamicina B). El esquema es una adaptación de otro de J. Davis.

Antibióticos y bacterias

El grupo de los antibióticos aminoglicósidos-aminociclitoles reviste todavía notable importancia en el tratamiento de las infecciones graves causadas por bacterias gram-negativas. Pero la aparición de cepas resistentes ha limitado su uso terapéutico, creando un problema clínico obvio. En nuestro laboratorio de microbiología de la Facultad de Medicina de la Universidad de Zaragoza hemos trabajado con las enzimas bacterianas responsables de esa resistencia. La aplicación de la técnica autorradiográfica a su caracterización permite objetivar de forma sensible y específica los productos de la reacción enzimática en geles de poliacrilamida.

Tres son los mecanismos de resistencia bacteriana a los aminociclitoles. Consiste el primero en la alteración de los ribosomas por mutación; es infrecuente y tiene escasa incidencia clínica. Muy frecuente, y de origen plasmídico, es el segundo mecanismo: modificación enzimática, que se presenta tanto en bacterias gram-negativas como gram-positivas. El tercer mecanismo es el de interferencia del transporte activo, por mutación; su importancia ha crecido desde la utilización de aminociclitoles resistentes a la inactivación enzimática.

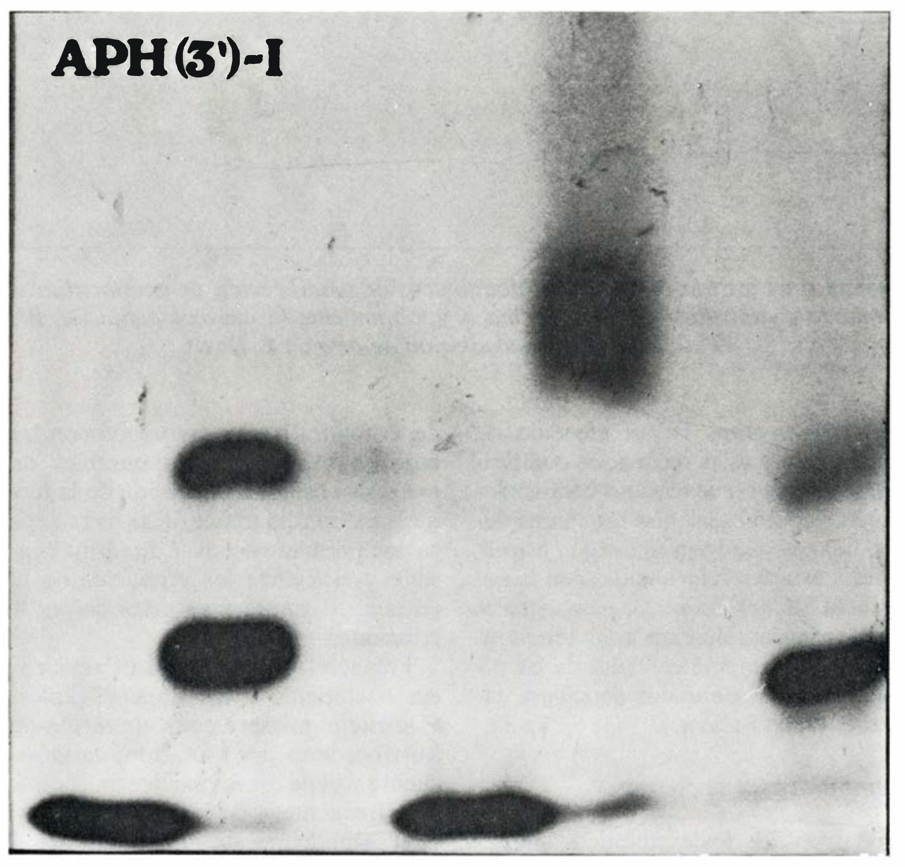
Tres son, a su vez, los mecanismos bioquímicos de modificación de las mo-

léculas de aminociclitoles: N-acetilación, O-nucleotidilación y O-fosforilación. ¿En qué consiste la N-acetilación? Las enzimas acetilantes catalizan la transferencia de acetato de la acetil-coenzima *A* a un grupo amino del antibiótico. Estas acetilasas modifican sólo los aminociclitoles que contienen 2-desoxiestreptamina, quedando por tanto excluidos la estreptomicina y la espectinomicina. La acetilación enzimática puede producirse en tres grupos amino distintos, situados en la posición 3, 2′ y 6′ de la molécula, lo que revela la existencia de tres tipos de acetiltransferasas: AAC(3), AAC(2′) y AAC(6′), que presentan distinta afinidad para con los aminociclitoles.

El segundo mecanismo bioquímico de modificación de los aminociclitoles era por O-nucleotidilación. En ésta, las enzimas adenilantes (AAD) utilizan trifosfato de adenosina (ATP) u otros nucleótidos como substratos para modificar grupos hidroxilos (OH). Así, la enzima nucleotidilasa ANT (2″) cataliza la nucleotidilación del grupo OH en la posición 2″ de la aminohexosa III y tiene afinidad por varios substratos: kanamicinas, gentamicinas, sisomicina y tobramicina.

El tercer mecanismo bioquímico de modificación de los aminociclitoles corre a cargo de las enzimas fosfotransferasas. Las APH, que así se abrevian, catalizan la fosforilación de grupos hidroxilo. Pueden utilizar como cofactores los nucleótidos ATP, CTP, GTP o UTP: trifosfatos de adenosina, citosina, guanosina y uridina, respectivamente. Estas enzimas son en realidad fosfoquinasas, ya que toman un fosforilo del ATP y lo transfieren al antibiótico.

Para determinar las enzimas modificantes puede utilizarse el método radio-enzimático, el de las concentraciones inhibitorias mínimas de una serie de aminoglicósidos seleccionados y la cromatografía líquida de alta presión caracterizando los productos de la reacción; se puede establecer la modificación producida en los antibióticos mediante técnicas analíticas como la espectrometría de masas o la resonancia nuclear magnética.



Autorradiograma de la fosfotranferasa APH (3′)-I codificada por el plásmido pUZ 129. *Las dos bandas más bajas corresponden a la reacción con kanamicina y ribostamicina. Neomicina y paromomicina, con grupos OH en posición 3′ y 5″, dan dos bandas cada una. Lividomicina, que sólo posee un hidroxilo en posición 5″, da una banda, que es la de mayor peso molecular. No reaccionan butirosina ni amikacina, que tampoco son substratos para la enzima APH (3′)-I.*

Como las bacterias portadoras de plásmidos *R* pueden sintetizar dos o más enzimas, los fenotipos de resistencia suelen ser muy diversos, sin que pueda predecirse con exactitud la modificación enzimática responsable. Un buen ejemplo es la cepa de *Serratia marcescens* 737 estudiada en nuestro laboratorio, que codificaba tres clases de enzimas: AAC (6′), ATN (2″) y APH (3′) (5″).

El extracto enzimático crudo fosforilaba kanamicina, ribostimicina, peromonicina, lividomicina y butirosina. Utilizaba ATP marcado con fósforo radiactivo, P-32, como segundo substrato. Este espectro podía corresponder a la existencia de dos fosfotransferasas APH (3′)-I y APH (3′)-II, o bien a una sola, la APH (3′)-III.

Para tratar de resolver el problema sin necesidad de purificar la enzima o las enzimas implicadas, recurrimos a la técnica de la electroforesis en gel de poliacrilamida con dodecilsulfato (SDS-PAGE), utilizando en cada reacción el extracto enzimático crudo, un aminociclitol, y como segundo substrato ATP marcado con fósforo radiactivo.

Con M. J. Rivera y B. Grasa decidimos llevar la reacción enzimática de fosforilación al gel para que, en caso de producirse la misma, el complejo fósforo radiactivo-ATP actuase de "revelador". En los primeros ensayos preferimos utilizar cepas de nuestra colección que producían enzimas ya caracterizadas como *E. coli* 129, que codificaba una APH (3′) (5″)-I, y *E. coli* 62, que sintetizaba una APH (3′)-II.

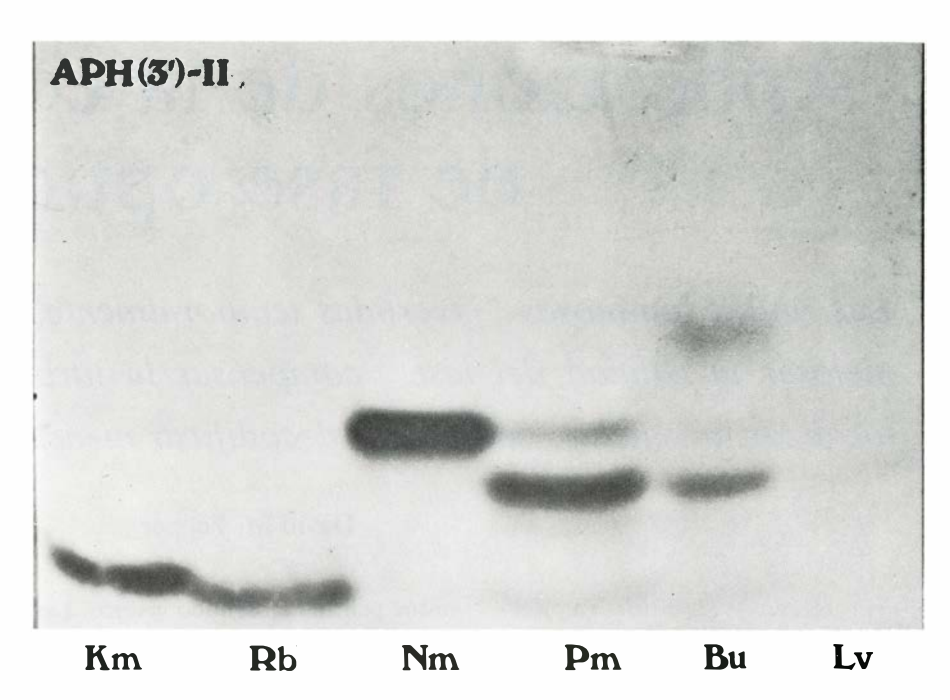
Trabajando con los extractos enzimáticos crudos de *E. coli* 129 y de *E. coli* 62 analizamos los productos de la reacción, detectando la existencia de diversas bandas con pesos moleculares diferentes con afinidad específica por cada aminociclitol. El estudio de la fosforilasa APH (3′) (5″)-I nos sugirió la posible correlación de cada una de las bandas con los grupos hidroxilos diana de las moléculas de los aminociclitoles. En efecto, tanto kanamicina *A* como kanamicina *B*, que tienen un grupo OH en posición 3″, daban una sola banda, comportamiento acorde con la afinidad exclusiva de la citada fosforilasa del grupo 3′-OH. Paromomicina y neomicina tienen dos hidroxilos modificables (3′ y 5″) y dan dos bandas cada uno. Interpretamos que la banda de peso molecular más bajo corresponde al producto de la reacción en 3′, mientras que la de peso molecular más elevado refleja la fosforilación en 5″.

Sin embargo, las dos bandas de paromomicina poseen los pesos moleculares ligeramente inferiores a los de neomicina, que es una 6′-amino-paromomicina. Este hecho podría reflejar la única diferencia existente entre ambas moléculas, esto es, la presencia de un grupo hidroxilo en posición 6′ en la paromomicina y la de un grupo amino, en la misma posición, en la neomicina. La sexta banda, la de mayor peso molecular, corresponde a lividomicina, que es una 3′-desoxiparomomicina, y por tanto sólo presenta un hidroxilo modificable en posición 5″.

La APH (3′)-II codificada por el plásmido *pUZ62*, análogamente a la fosforilasa APH (3′) (5″)-I, da una primera banda común para kanamicina *A*, kanamicina *B* y ribostamicina; esta última es la de peso molecular menor. En contraste, paromomicina y neomicina dan una sola banda por antibiótico, equivalente a los de peso molecular más bajo de la fosfotransferasa APH (3′) (5″)-I con paromomicina y neomicina y que corresponderían al producto de la reacción con los hidroxilos en posición 3′. Esta valoración está reforzada por el previo conocimiento de que la enzima APH (3′)-II se fija sólo en los grupos OH en posición 3′, siendo incapaz de actuar sobre el hidroxilo 5″. Por esta razón, y teniendo en cuenta su falta de afinidad por la lividomicina (que posee un 5″-OH y carece de hidroxilo en posición 3′), era lógica la falta de la banda de peso molecular más elevado, que no apareció en el autorradiograma.

Otro aspecto diferencial entre la APH (3′) (5″)-I y la APH (3′)-II es que la segunda enzima tiene afinidad por butirosina. Y así fue que el producto de la reacción en el gel mostró una banda muy intensa al mismo nivel que la banda alta de neomicina, la correspondiente al hidroxilo en posición 5″. Además podía apreciarse una banda más tenue a la altura de la banda baja de paromomicina, que reflejaría la fijación en 3′.

Patrice Courvalin, del Instituto Pasteur de París, nos proporcionó cepas productoras de fosfotransferasas APH (3′) (5″)-I, II, III y IV, destacando por su interés la que portaba el plásmido *pAT21*, en el que había clonado el gen que codificaba una APH (3′) (5″)-III. El experimento fue satisfactorio, ya que obtuvimos una reproducción de los patrones de bandas al aplicar la técnica SDS-PAGE con ATP marcado; llamó la atención que con una misma subclase de APH (3′) (5″) el autorradiograma permitía diferencias más sutiles, como una "huella" de la reacción enzimática.



Autorradiograma de la fosfotransferasa APH (3′)-II, sintetizada por el plásmido pUZ 62. *Las bandas de la parte inferior izquierda corresponden a kanamicina y ribostamicina, y son las de peso molecular más bajo. Neomicina da una sola banda, así como paromomicina, a las que la enzima modifica sólo en posición 3′. Butirosina presenta dos bandas, lo que sugiere una reacción con grupos OH en 3′ y 5″. Lividomicina no es substrato para la enzima APH (3′) y, por tanto, no reacciona.*

El ensayo con la cepa de *E. coli* C1A que albergaba el plásmido *pAT21*, nos permitió establecer que el llamado "gen de la kanamicina", que sintetizaba una APH (3′) (5″)-III, daba un autorradiograma con seis bandas correspondientes a los productos de la reacción con los antibióticos-sustratos específicos; era éste, pues, un patrón similar al obtenido con la cepa *S. marcescens* 737, portadora del plásmido *pUZ 737* y posible productora de una APH (3′) (5″)-III.

Intentando conocer mejor la posible relación entre una enzima y los diversos productos de la reacción con los aminociclitoles, procedimos a purificar la enzima. Partimos de la cepa *E. coli pUZ* 62, que codificaba una APH (3′)-II, cuyo extracto enzimático crudo se llevó a un gel de poliacrilamida sin dodecilsulfato. Después de 4 horas se procedió a cortarlo de abajo arriba, en tiras de 3 milímetros, llevándose a tubos con 0,5 mililitros de solución tampón para lograr la elución de la enzima. Luego, se determinó en cada fracción la actividad fosforilante con el método radioenzimático, procediéndose a la lectura en un contador de centelleo Beckman. La fracción que contenía la máxima actividad enzimática se llevó a gel de poliacrilamida, apareciendo una banda única. Al practicar la técnica con la enzima purificada (PM = 42.000 y PI = 4,3) obtuvimos un autorradiograma idéntico al conseguido con el extracto enzimático crudo.

El comportamiento de las enzimas de la clase APH (3′) (5″) cuando se enfrentan a los diferentes aminociclitoles dando diversas bandas llama la atención por la relación entre el número de bandas y el de hidroxilos diana. Asimismo, estos hallazgos son congruentes con la aparición de bandas si el gel de poliacrilamida lleva dodecilsulfato, sugiriendo que las fosfotransferasas 3′, 5″, pueden estar integradas por un número de subunidades, y que el mecanismo de la reacción enzimática es bastante peculiar.

No obstante, lo que parece evidente es que las bandas son los productos de la reacción enzimática, que retienen la radiactividad y por eso son demostrables mediante la autorradiografía. La relación que suponemos válida de "un grupo OH modificable - una banda" o "dos grupos OH modificables - dos bandas" parece confirmarse al haber aplicado la técnica a la acetilasa AAC (6′) purificada, encontrando una sola banda con kanamicina *A* probablemente porque sólo un grupo amino se modifica, el que está en posición 6′. El estudio se ha ampliado a varias subclases de acetilasas AAC (3)-I, II y V, con análogos resultados, ya que aparecen bandas únicas con cada antibiótico cuyo grupo amino se halla en posición 3. (R. Gómez-Lus.)

Aplicaciones de la conjugación de fase óptica

Las ondas luminosas "invertidas temporalmente" se pueden utilizar para mejorar la calidad del láser, compensar la turbulencia de la atmósfera, localizar un satélite, codificar y decodificar mensajes y comparar imágenes

David M. Pepper

En el año 1972, Boris Ya. Zel'dovich y sus colaboradores observaron un fenómeno curioso en el curso de un experimento realizado en el Instituto Lebedev de Física de Moscú. Distorsionaron intencionadamente un haz intenso de luz roja procedente de un láser pulsante de rubí, haciéndole atravesar una lámina de vidrio translúcido. A continuación, el haz alterado atravesaba un largo tubo lleno de gas metano a presión elevada. De acuerdo con un efecto conocido, denominado difusión de Brillouin estimulada, el haz interactuaba con las moléculas del gas y se reflejaba hacia atrás; el gas se comportaba como si fuera un espejo, aunque se tratara de un espejo muy peculiar. Lo que sorprendió a los investigadores fue el hecho de que si la onda reflejada se hacía pasar de nuevo a través de la misma pieza de vidrio translúcido, se obtenía un haz óptico emergente sin distorsionar, casi perfecto. En otras palabras, las distorsiones producidas durante el primer paso a través del vidrio habían desaparecido. (La reflexión en un espejo plano ordinario, en cambio, hubiera aumentado las distorsiones.) En consecuencia, la onda que se movía hacia atrás podía considerarse una réplica invertida temporalmente de la onda incidente.

El término "inversión temporal" se utiliza para indicar que el haz reflejado está afectado por todas las distorsiones que introduce la lámina de vidrio translúcido, pero en sentido inverso. Por tanto, cuando el haz vuelve a atravesar la lámina de vidrio, las propiedades distorsionadoras de dicha lámina compensan los efectos producidos originalmente. En otras palabras, si fuera posible hacer una película animada del haz incidente, el haz invertido temporalmente se obtendría proyectando la misma película en sentido inverso. Las ondas invertidas temporalmente se conocen con la expresión más precisa de ondas con la fase conjugada, o réplicas con el frente de onda invertido. La técnica utilizada para generar estas ondas se denomina conjugación de fase óptica [véase "Conjugación de fase óptica", de Vladimir V. Shkunov y Boris Ya. Zel'dovich, publicado en INVESTIGACIÓN Y CIENCIA el mes pasado].

La técnica de la conjugación de fase óptica tiene muchas aplicaciones interesantes. Por ejemplo, un haz óptico de alta calidad puede transmitirse a través de una atmósfera turbulenta y, una vez generado el correspondiente haz de fase conjugada, hacer que recorra hacia atrás exactamente el mismo camino. En consecuencia, cuando el haz regrese a su punto de origen, no presentará ninguna degradación. Estos haces se pueden utilizar en la localización y seguimiento de objetos en movimiento, en el procesado de imágenes, cálculo óptico, interferometría, giroscopios de láser, sistemas de comunicación por fibra óptica y por satélite, sistemas de armas basados en el láser y fotolitografía. Los "espejos" que originan los haces de fase conjugada abren también la posibilidad de nuevos resonadores de láser.

Generación de luz invertida temporalmente

Dos métodos habitualmente utilizados en la producción de ondas con la fase conjugada son la difusión de Brillouin estimulada y la mezcla de cuatro ondas. En los años subsiguientes al trascendental experimento de Zel'dovich, varios investigadores descubrieron que la conjugación de fase por difusión de Brillouin estimulada puede tener lugar en otros muchos medios, además de en un gas comprimido. Todos estos materiales se conocen como medios no lineales. Esta expresión se utiliza aquí con un significado especial: las propiedades ópticas de los medios no lineales, a diferencia de lo que sucede en los lineales, resultan afectadas por la luz. Ejemplos de medios no lineales se encuentran en los semiconductores, cristales, líquidos, plasmas, cristales líquidos, aerosoles y vapores atómicos.

Los medios no lineales se utilizan también en el método de mezcla de cuatro ondas, una técnica introducida, en 1977, por Robert W. Hellwarth, de la Universidad del Sur de California, y ampliada posteriormente por los estudios de Amnon Yariv, del Instituto de Tecnología de California, el autor de este artículo (en aquel entonces también en el Caltech), David M. Bloom, Gary C. Bjorklund y Paul F. Liao, de los laboratorios ATT Bell. Este método se basa en la interacción de cuatro haces ópticos en un medio no lineal: tres haces son de entrada y uno de salida. Los tres haces de entrada consisten en un haz de prueba, cuya inversión temporal se desea, y dos haces de bombeo que se propagan en sentidos opuestos, necesarios para "sensibilizar" el medio no lineal. Los pasos que conducen a la producción del cuarto haz, es decir, del haz de fase conjugada, son análogos a los que se siguen en una holografía convencional. En una holografía ordinaria se ilumina una emulsión fotográfica con la luz procedente de un objeto y con un haz de referencia. El haz de referencia y la luz procedente del objeto interaccionan y dan lugar a un holograma, o figura de interferencia tridimensional, sobre la citada emulsión. Una vez revelada la película, el holograma fijo o estático puede reproducirse iluminando dicha película con

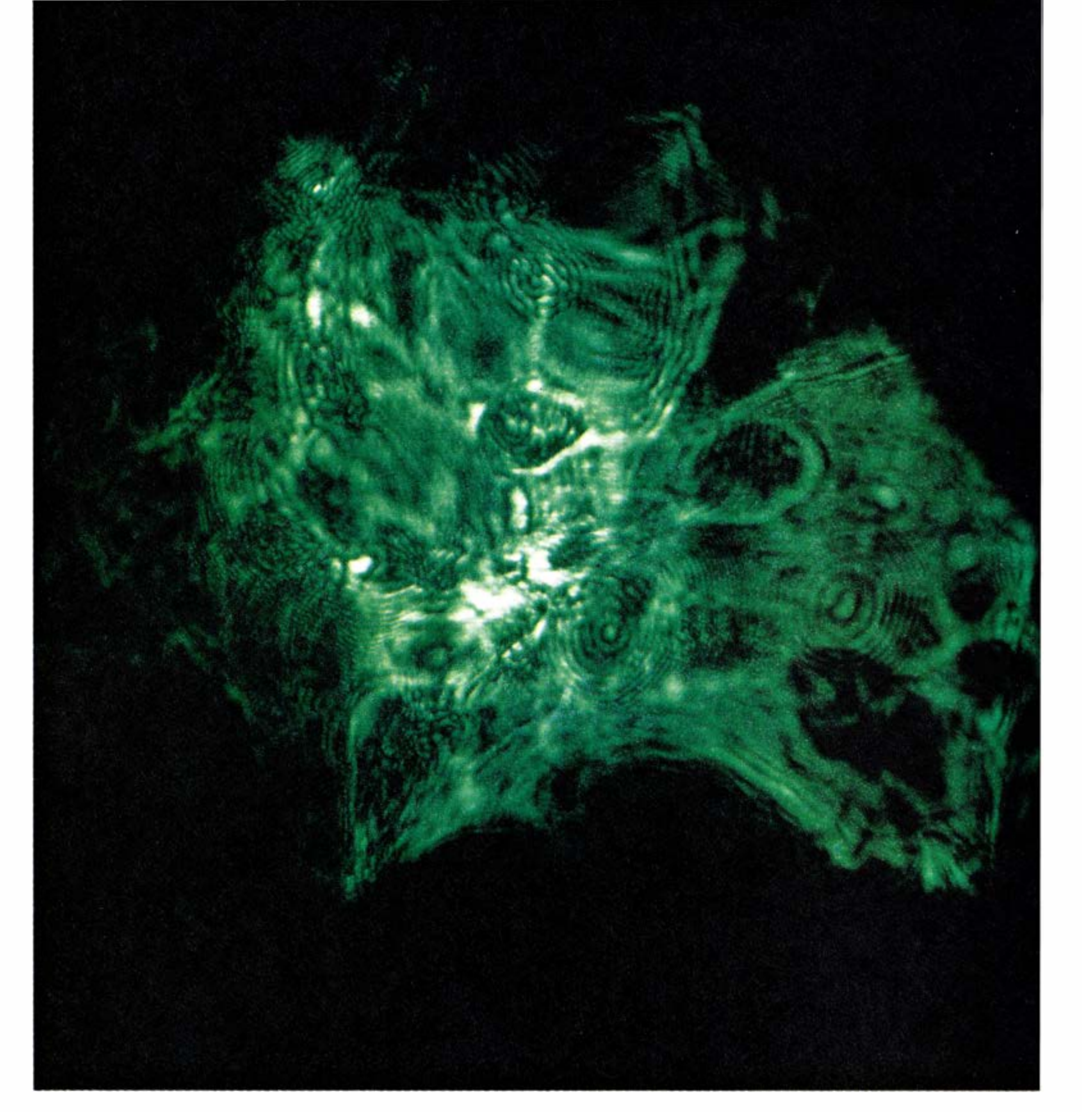
el mismo haz de referencia. El resultado de este proceso es una reconstrucción tridimensional de la imagen del objeto.

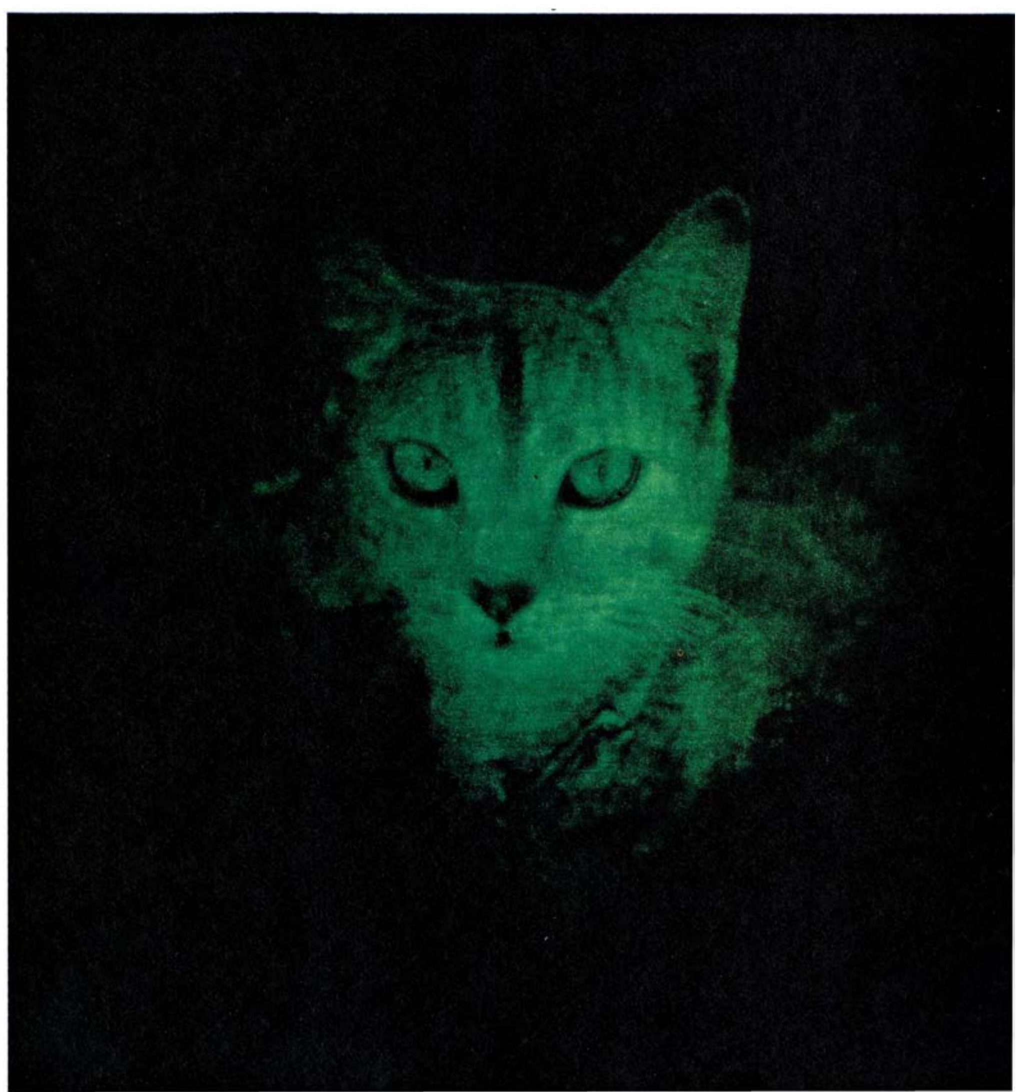
En el método de la mezcla de cuatro ondas, el medio no lineal actúa como la emulsión fotográfica. La interacción entre el haz de prueba, el objeto, y uno de los haces de referencia, de bombeo, produce una figura de refuerzo y anulación de ondas (es decir, de interferencias constructivas y destructivas) en el medio considerado, semejante a un holograma dinámico en tiempo real. El haz de salida con la fase conjugada se origina cuando el otro haz de bombeo, que se propaga en sentido contrario al anterior, se refleja en el holograma. En realidad se crean dos hologramas: cada haz de bombeo, en conjunción con el haz de prueba, da lugar a un holograma en el que se refleja el otro haz de referencia.

Aunque estos dos métodos –la difusión de Brillouin estimulada y la mezcla de cuatro ondas– presentan ventajas e inconvenientes, el resultado final en ambos casos es un espejo conjugador de fase, es decir, un espejo peculiar de tres dimensiones que "refleja" el haz original de forma tal que el haz reflejado recorre exactamente en sentido inverso el camino seguido por el haz original. En ambos casos, el aspecto dinámico del medio no lineal permite que el espejo conjugador de fase responda a los haces de entrada variables con el tiempo. Se reta al lector a que trate de imaginar, mientras lee este artículo, lo que vería si se situara frente a uno de estos espejos. (La respuesta se dará al final del trabajo.)

Optica adaptativa

La conjugación de fase óptica tiene muchas aplicaciones debido a que existe frecuentemente la necesidad de compensar las distorsiones estáticas o dinámicas que presentan los sistemas



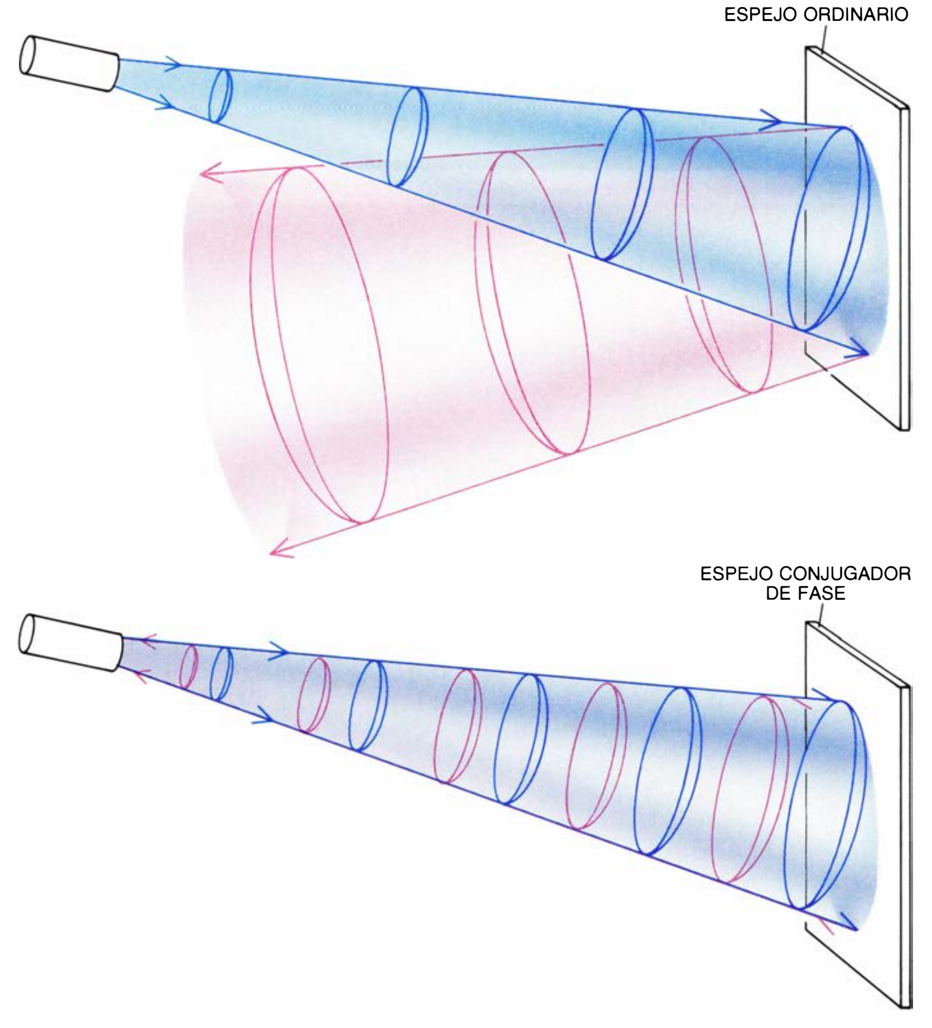


1. ESPEJO CONJUGADOR DE FASE, capaz de compensar las distorsiones existentes en la imagen de un gato. En ambas fotografías, las imágenes se distorsionaron al transmitirse a través de una lámina de vidrio translúcido. La reflexión de la imagen a través de la misma lámina mediante un espejo ordinario produce una imagen irreconocible (*fotografía superior*). Mas la reflexión de la imagen a través de dicha lámina mediante un espejo conjugador de fase corrige la imagen distorsionada (*fotografía inferior*). La explicación de este resultado radica en el hecho de que un espejo conjugador de fase produce un haz que se propaga hacia atrás, a través del vidrio distorsionador, en "inversión temporal": su trayectoria coincide exactamente con la del haz original y, por tanto, las distorsiones se corrigen. Este ensayo fue llevado a cabo por Jack Feinberg, de la Universidad del Sur de California, con un láser de argón.

ópticos. Los láseres de alta potencia, los sistemas de rastreo, las redes de comunicación atmosférica y los sistemas fotolitográficos están todos afectados por este ruido; dicho ruido puede también reducir la efectividad de un sistema de armamento. Tanto la mezcla de cuatro ondas como la difusión de Brillouin estimulada pueden ayudar a resolver esos problemas.

Muchas de estas aplicaciones se basan en la denominada geometría de doble paso, un dispositivo en el que un haz de láser es conjugado de fase y reflejado de forma tal que atraviese dos veces el mismo medio. El haz reflejado recorre exactamente el mismo camino que el haz incidente en un sentido invertido temporalmente. En un ejemplo de esta geometría, un dispositivo de láser de baja potencia inyecta un haz luminoso muy direccional en un amplificador constituido, generalmente, por un sólido o un gas de átomos o moléculas altamente excitados. Cuando dicho haz atraviesa el amplificador "cosquillea" a las moléculas y provoca la emisión de su energía en forma de radiación. Se obtiene así un haz de alta potencia, pero a costa de la direccionalidad: las irregularidades del medio amplificador distorsionan el haz dando lugar a cierta divergencia. Las distorsiones se pueden eliminar si el haz llega a un espejo de conjugación de fase situado al final del amplificador. Cuando el haz conjugado de fase procedente de dicho espejo atraviesa el amplificador hacia atrás, su movimiento, exactamente el inverso del haz original, anula los efectos degradantes del medio. El haz de doble paso que emerge del amplificador posee a la vez cualidades de alta potencia y de alta direccionalidad.

Como consecuencia de una serie de consideraciones fundamentales y prácticas, existen ciertos límites al tamaño físico de estos amplificadores y, por consiguiente, a la potencia de salida que pueden proporcionar. Utilizando un conjunto de amplificadores dispuestos en paralelo y un espejo de conjugación de fase, se pueden compensar las distorsiones ópticas producidas en el seno de cada amplificador y sincronizar todos los amplificadores. Dado que este dispositivo se comporta como un sistema de elementos de amplificación en fase óptica, la intensidad máxima del haz de salida es proporcional al cuadrado del número de amplificadores. La intensidad máxima que produce un conjunto de amplificadores con la fase de la radiación aleatoria es simplemente proporcional al número de amplificadores. El esquema básico, propuesto por Nikolay G. Basov y sus colaboradores, en el Instituto Lebedev de Física, y por Thomas R. O'Meara y sus colaboradores, en los laboratorios Hughes, ha sido comprobado por David A. Rockwell y Concetto R. Giuliano, también de Hughes.

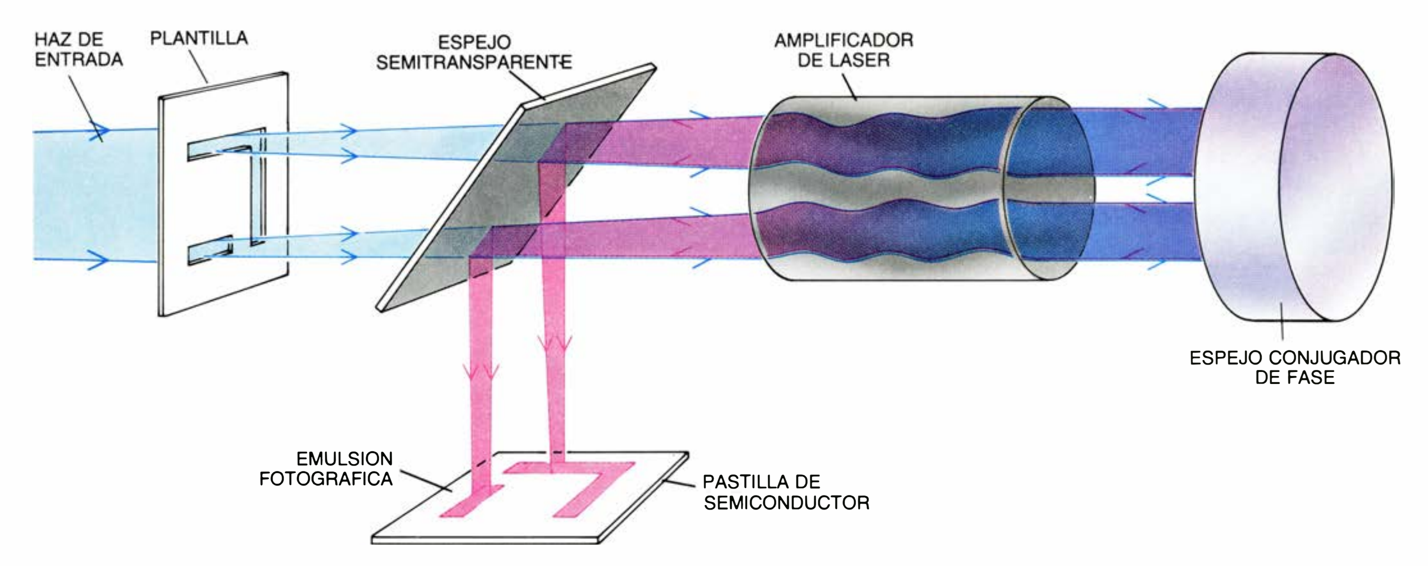


2. PROPIEDADES DE UN ESPEJO CONJUGADOR DE FASE y su comparación con las de un espejo ordinario. Tal como se muestra en esta figura, un haz de luz ilumina ambos espejos. El espejo ordinario (*arriba*) refleja simplemente el haz. El espejo conjugador de fase (*abajo*) recompone el haz divergente de forma tal que se produce un haz convergente, "invertido temporalmente" e independiente del ángulo.

Interacción

Otro ejemplo de geometría de doble paso es el proceso de autointeracción de la radiación, basado también en la utilización de una fuente láserica de baja potencia. En este caso, sin embargo, el láser ilumina directamente un blanco tal como una célula de fusión conteniendo una mezcla de deuterio y tritio (isótopos del hidrógeno). Una fracción de la luz difundida por la célula atraviesa un amplificador cercano. Cuando el haz atraviesa dicho amplificador su potencia aumenta. Un espejo conjugador de fase situado al final del amplificador produce un intenso haz invertido temporalmente que se devuelve hacia el blanco. Si el haz fuera suficientemente potente, los núcleos encerrados en la célula experimentarían un proceso de fusión y darían lugar a la liberación de energía utilizable.

La autointeracción se puede aplicar también a otras situaciones: la célula de fusión se puede reemplazar por un satélite en órbita. Al iluminar dicho satélite, una fracción de la luz difundida por él y recogida por un sistema de láser conjugado de fase puede amplificarse y devolverse al satélite. Siempre que la atmósfera interpuesta y la posición del satélite no varíen apreciablemente en el tiempo que dura el recorrido de ida y vuelta de la luz, el espejo conjugador de fase no sólo compensará la turbulencia atmosférica (el fenómeno que produce el "parpadeo" de las estrellas), sino que hará posible también la localización del satélite manteniendo constantemente sobre él un haz iluminador. Después, el satélite podría



3. EN VIRTUD DE LA FOTOLITOGRAFIA se transfiere una figura bidimensional desde un plano del espacio a otro; puede llevarse a cabo mediante un espejo conjugador de fase. Este proceso permite transferir una plantilla conteniendo un circuito microelectrónico sobre una pastilla de un material semiconductor ("chip") recubierta con una emulsión fotográfica. El haz de luz procedente de un láser (*azul*) atraviesa la plantilla, un espejo semitransparente y un amplificador de láser. Aunque el amplificador aumenta la potencia del haz, las irregularidades del medio distorsionan su calidad. El haz con su fase conjugada (*rojo*) se propaga en sentido inverso a través del amplificador, corrigiendo las distorsiones y emergiendo del sistema con toda la información del haz original. Después de reflejarse sobre el espejo semitransparente, la imagen reforzada de la plantilla impresiona la emulsión. Este sistema compensa las aberraciones ópticas, posee una elevada resolución para un amplio campo, elimina el moteado del láser, minimiza el haz y evita el contacto físico con el soporte.

dirigir el haz de láser amplificado sobre un misil y, si la radiación fuera suficientemente intensa, destruirlo. Tales sistemas de armas basados en el láser se han venido estudiando desde principios de la década de los setenta.

Formación de imágenes sin lentes

El número de lentes utilizado en muchos sistemas ópticos es tan elevado que dichos sistemas son difíciles de controlar y ajustar. La utilización de dispositivos de fase conjugada permitiría eliminar esa dificultad. Por ejemplo, tales dispositivos podrían transmitir una figura bidimensional desde un plano del espacio a otro. Este es, precisamente, el objeto de la fotolitografía, técnica con la que se transfiere una plantilla que contiene un circuito microelectrónico hasta una pastilla de material semiconductor (chip) recubierta con una emulsión fotográfica. (El contacto físico directo de la plantilla con el sustrato puede ser poco conveniente.)

La posibilidad de dicha transferencia de imagen ha sido demostrada por Marc D. Levenson y sus colaboradores, de IBM, y, más recientemente, por Malcom C. Gower, del laboratorio Rutherford, en Inglaterra. La luz de un láser atraviesa la plantilla, un espejo semitransparente y, finalmente, un amplificador. La intensidad del haz aumenta a costa de sufrir distorsiones él mismo. La imagen resultante se devuelve, a través del amplificador, merced a un espejo conjugador de fase. El haz invertido temporalmente es, a la vez, potente y libre de distorsión, así que, cuando se refleja en el espejo semitransparente, transfiere dicha figura sobre la emulsión. El sistema de conjugación de fase resulta ventajoso en relación con los sistemas convencionales tales como la compensación de aberraciones ópticas.

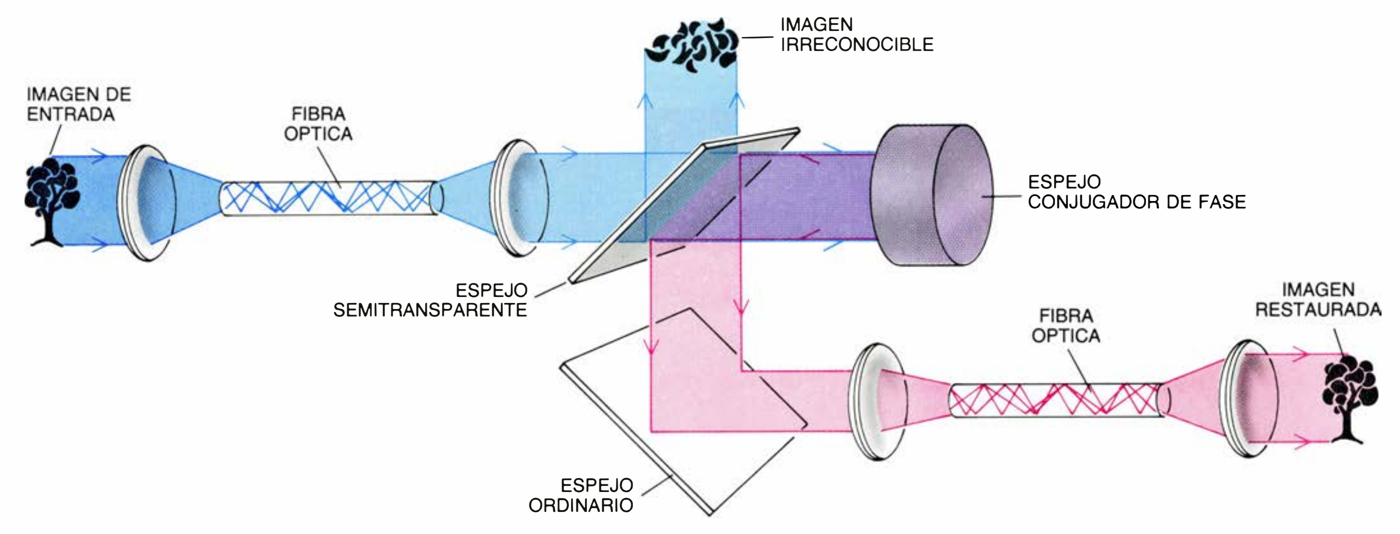
Los dispositivos de formación de imágenes sin lentes basados en la conjugación de fase óptica resultan también útiles para otras aplicaciones. Una de tales aplicaciones consiste en la eliminación de las distorsiones que se producen en los cables de fibra óptica. Supongamos que se envía una imagen tridimensional (por ejemplo, la imagen de un árbol) a través de una lámina de vidrio. Esta lámina no degrada de forma significativa la calidad de la imagen. Si dicha lámina se reemplaza por una fibra óptica larga, la imagen será irreconocible tras recorrer algunos centímetros. La razón de este hecho estriba en que la imagen del árbol viaja mediante muchos modos ópticos, cada uno de los cuales corresponde a un rayo diferente que zigzaguea a lo largo de la fibra. Dado que cada uno de los modos recorre un camino distinto, los diferentes rayos se habrán desfasado al llegar al final de la fibra, es decir, ya no tendrán la misma relación de fase que tenían al principio. En otras palabras, la fibra óptica deforma la imagen de manera análoga a como lo hace una lámina de vidrio translúcido.

La imagen puede descifrarse si la fase se conjuga y dicha imagen se devuelve hacia atrás a través de la fibra en cuestión o de otra fibra idéntica. Este método, sugerido inicialmente por Yariv, ha sido verificado con éxito por Gilmore J. Dunning y Richard C. Lind, de los laboratorios Hughes, y más recientemente por Baruch Fischer y Shmule Sternklar, del Instituto Tecnion de Israel. Aunque todos estos autores han trabajado con imágenes bidimensionales, en principio la técnica podría permitir también la transmisión de imágenes tridimensionales a través de fibras ópticas.

Resonadores de fase conjugada

¿Cómo se modificaría el funcionamiento de un láser si se reemplazara uno o ambos espejos por un espejo conjugador de fase, para constituir lo que se denomina un resonador de fase conjugada? Un resonador consiste en una cavidad hueca cuyo objetivo es el reforzamiento de una onda sonora o de una onda electromagnética. En general, está constituido por un tubo largo, lleno de un medio amplificador (un sólido o un gas), cerrado en ambos extremos por sendos espejos semitransparentes perfectamente pulimentados. El haz de láser se obtiene cuando la luz atraviesa uno de los espejos.

En el año 1978, un equipo de investigadores del Instituto de Tecnología de California, dirigido por Yariv, y en el que se incluían John C. Auyeung, Dan Fekete y el autor de este artículo, estudió dicha cuestión. En el curso de nuestro trabajo, desarrollamos con



4. DISTORSIONES debidas a los cables de fibra óptica; pueden corregirse con un conjugador de fase. El que estas distorsiones se produzcan obedece a que una imagen espacial (*izquierda*), enviada a lo largo de un cable, viaja mediante muchos modos ópticos: cada modo corresponde a un rayo particular que zigzaguea por el interior de la fibra (*azul*). Cada modo recorre un camino diferente; cuando todos llegan al final de la fibra han quedado desfasados y dan lugar a una imagen borrosa (*centro*). La definición de la imagen puede recuperarse si se procede a conjugar su fase (*rojo*) y se la envía a lo largo de un cable idéntico al anterior.

éxito el primer láser pulsante de fase conjugada. En nuestro experimento se utilizó una barra de rubí como medio amplificador. Se colocó un espejo ordinario en uno de los extremos de la barra y un espejo conjugador de fase en el otro extremo. El espejo conjugador de fase, en este caso un mezclador de cuatro ondas, consistió en una célula llena de disulfuro de carbono; los haces de bombeo procedían de otro láser pulsante de rubí.

En la citada experiencia, se puso de manifiesto que los resonadores de fase conjugada poseen propiedades singulares. Quizá la propiedad más evidente es que el espejo conjugador de fase puede compensar las aberraciones estáticas y dinámicas de la cavidad, debidas, por ejemplo, a imperfecciones de los componentes ópticos, así como las perturbaciones dinámicas térmicas y mecánicas. En consecuencia, la eficiencia de un resonador de fase conjugada en la extracción de la energía óptica almacenada en el medio del láser es muy elevada. Un efecto más sutil está relacionado con lo que se conoce como "estabilidad del resonador". La capacidad de un resonador convencional para almacenar energía depende de la relación existente entre la radiación, la longitud de la cavidad y la curvatura del espejo. Un resonador de fase conjugada no presenta estas limitaciones.

Las propiedades de los resonadores de fase conjugada han sido estudiadas por diferentes grupos de investigación, entre los que se incluyen los centros de Hughes, Caltech y la Universidad de Stanford, en los Estados Unidos, y varios laboratorios de la Unión Soviética, Francia, Gran Bretaña y Canadá. Se han utilizado tanto los dispositivos basados en la mezcla de cuatro ondas como los de la difusión de Brillouin estimulada.

Por ejemplo, Lind y Duncan G. Steel (en ese momento en los laboratorios de investigación Hughes) han construido recientemente el primer resonador de fase conjugada de funcionamiento continuo. El espejo conjugador de fase utilizado por estos autores consistió en una celda de un centímetro llena de vapor de sodio atómico bombeado por un láser de color. La inserción de una lámina esmerilada de vidrio en el interior de la cavidad del láser no producía apenas efecto alguno sobre el sistema: se seguía obteniendo un haz de calidad razonablemente buena, incluso en el caso de que la citada lámina se moviera en el interior de la cavidad. La presencia de la misma lámina esmerilada impedía que una versión convencional del mismo tipo de láser produjera cualquier tipo de haz.

Utilizando un mezclador de cuatro ondas se puede construir un resonador de fase conjugada especialmente interesante. Puesto que se utilizan dos haces de bombeo, la intensidad del haz de salida conjugado de fase puede ser mayor que la intensidad del haz de entrada. En otras palabras, un mezclador de cuatro ondas puede tener cierta ganancia óptica. Estos mezcladores de cuatro ondas constituyen los llamados espejos amplificadores de conjugación de fase. Se puede, pues, conseguir incluso el funcionamiento de un resonador de láser "vacío", formado sólo por un espejo amplificador de conjugación de fase y un espejo ordinario; no se necesita un medio de amplificación interno. Dado que el espejo conjugador de fase refleja también cualquier luz que llegue a él, devolviéndola al punto de origen, el láser funcionará incluso en el caso de que el espejo ordinario se mueva. Yariv y el autor diseñaron uno de tales dispositivos que, con la ayuda de Fekete, comprobamos. Este mismo dispositivo ha sido utilizado también por Bloom, Liao y N. P. Economou, en los laboratorios ATT Bell.

El resonador láser más avanzado fue posiblemente el construido por Jack Feinberg, de la Universidad del Sur de California, y Hellwarth. Se limitaron a colocar sencillamente una espátula de cocina junto a un espejo conjugador de fase (un cristal de titanato de bario irradiado por un láser). Las propiedades amplificadoras del espejo conjugador de fase creaban un resonador conjugado de fase, en el que los espejos de la cavidad estaban formados por el cristal y la superficie reflectora de la espátula. Entre la espátula y el cristal se originaba, entonces, un haz intenso. El espejo conjugador de fase controlaba cualquier movimiento de la espátula manteniendo el haz sobre su superficie. Moraleja: en las proximidades de un espejo conjugador de fase no hay que llevar encima ningún objeto brillante.

Procesado de imágenes

La característica común de todos los procesadores de mezcla de cuatro ondas es la interacción óptica de los haces. En su consideración fundamental, el haz conjugado viene a ser el producto algebraico de los tres haces ópticos de entrada (el haz de prueba y los dos haces de bombeo que se propagan

en sentidos opuestos); el medio no lineal contenido en la célula de mezcla de cuatro ondas proporciona el efecto multiplicador a través del acoplamiento de los haces. Por tanto, si alguno de los haces de entrada –o todos ellos– está codificado espacialmente (lo cual se consigue haciendo que los haces atraviesen diversas diapositivas u otras transparencias ópticas) o temporalmente (lo que se consigue pulsándolos), el haz de salida conjugado estará codificado de forma proporcional al producto de toda la información de los haces que interaccionan.

Los grupos de investigación dirigidos por Yariv, en el Caltech, y por Osamu Ikeda, en el Instituto de Tecnología de Tokio, han demostrado que al codificar espacialmente los haces de bombeo, en vez del haz de prueba, en un mezclador de cuatro ondas, se pueden transmitir imágenes en "sentido único" incluso a través de un medio distorsionador. (Recordemos que las técnicas de formación de imágenes sin lentes que hemos examinado antes consisten en una transmisión de imágenes en doble paso.) Supongamos que una persona desee proyectar una imagen o una película (piénsese en una deportista saltando desde un trampolín) hasta un lugar alejado, donde se encuentra un amigo. Debido a la turbulencia atmosférica, la imagen de la nadadora sería irreconocible.

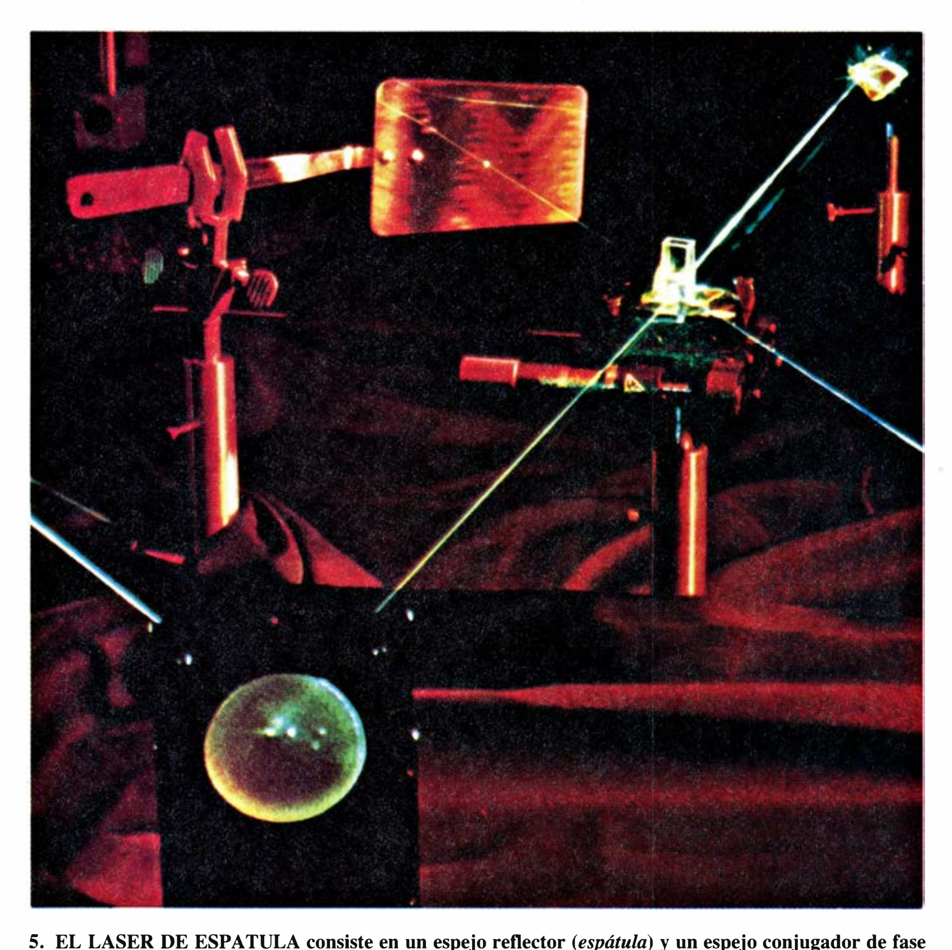
Sin embargo, dicha imagen se puede transmitir reemplazando el proyector por un mezclador de cuatro ondas y dotando de un láser al amigo receptor. Este proceso transcurre según se detalla a continuación. En primer lugar, el amigo dirige su haz de láser hacia la persona que proyecta la imagen. El haz distorsionado, tal como lo ve este sujeto, ha sondeado la turbulencia atmosférica. Si la persona en cuestión permite que la luz llegue a un mezclador de cuatro ondas convencional, el haz invertido temporalmente corregirá las distorsiones atmosféricas y volverá hasta el amigo sin transportar ninguna información. Sin embargo, si colocamos una transparencia de la saltadora en el camino de uno de los haces de bombeo, el espejo conjugador de fase puede codificarse espacialmente con la información deseada. De esta manera, el espejo conjugador de fase refleja una imagen predistorsionada de la nadadora. Como resultado de todo el proceso, la imagen que llega hasta el receptor provisto con el láser está exenta de distorsión.

El procesado de imágenes desempeña también un papel importante en campos tan diversos como la criminología (comparación de huellas dactilares), las ciencias biológicas y la medicina (clasificación e identificación de diferentes tipos de células y de sus mutaciones), la inteligencia artificial, la robótica y la automática.

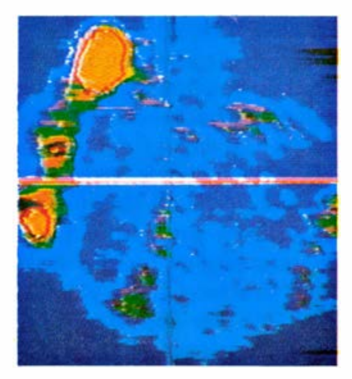
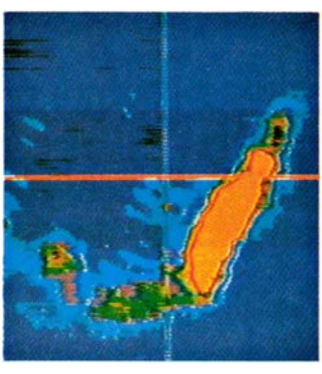
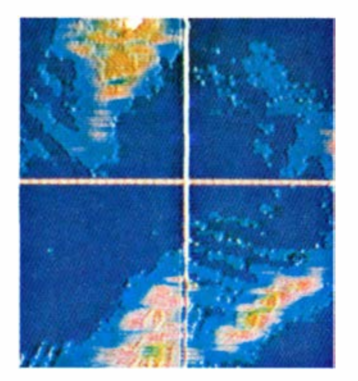
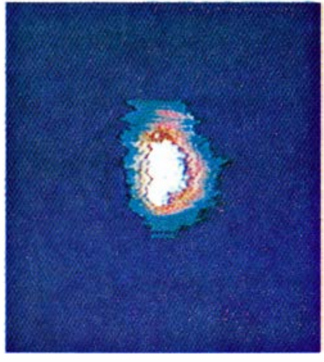
Otras aplicaciones

La utilización de sistemas ópticos muy complejos permitiría desarrollar todas estas técnicas de comparación y otras más. Por ejemplo, la holografía convencional se ha utilizado, durante algún tiempo, para llevar a cabo algunos procesos de formación de imágenes. La correspondiente teoría fue desarrollada, en 1963, por Anthony B. Vander Lugt, de la Universidad de Michigan; este autor desarrolló también varias clases de filtros de imágenes y sistemas de reconocimiento de imágenes, por medio de hologramas estáticos convencionales registrados en emulsiones fotográficas. El hecho de que la técnica de mezcla de cuatro ondas sea una forma de holografía dinámica, o en tiempo real, permite ampliar las posibilidades de esta técnica. Jean-Pierre Huignard, de Thomson-CSF, y Feinberg e Y. H. Ya, de Telecom, han aportado algunas contribuciones importantes en este campo.

Una aplicación potencial de la mezcla de cuatro ondas al procesado de imágenes consiste en un dispositivo de reconocimiento de imágenes en tiempo real. Este dispositivo fue diseñado, en 1978, por diferentes científicos y el autor de este artículo en el Caltech. Dicho dispositivo fue realizado por Jef-



5. **EL LASER DE ESPATULA** consiste en un espejo reflector (*espátula*) y un espejo conjugador de fase (*cristal en la intersección del haz*). Un láser ordinario consta de un tubo largo cerrado, en ambos extremos, mediante sendos espejos altamente pulimentados. En general, el tubo está lleno de un medio amplificador (un sólido o un gas altamente excitados). El láser de espátula no requiere un medio de amplificación debido a que el espejo conjugador de fase proporciona la ganancia necesaria. La amplificación se logra bombeando, es decir, excitando el cristal rectangular con dos haces de láser conocidos como haces de referencia, o de bombeo. Uno de los haces de bombeo entra en la fotografía por el ángulo inferior izquierdo y es reflejado por un espejo (*disco verde*) que lo hace llegar hasta un espejo conjugador de fase. Una fracción del haz del láser es absorbida por el cristal; la mayor parte del haz continúa su camino hasta llegar al espejo en forma de cuña situado en el ángulo superior derecho. El haz reflejado por este espejo se convierte en el otro haz de bombeo. Una vez que el cristal ha absorbido suficiente energía de los dos haces de bombeo propagándose en sentidos contrarios, empezará a emitir un rayo hacia cualquier superficie brillante que se encuentre próxima a él, como si la región situada entre el cristal y la superficie brillante estuviera llena de un medio amplificador. Queda así generado un haz de láser a lo largo de la línea entre el cristal y la espátula. Si la espátula se moviera, el espejo conjugador de fase se localizaría, manteniendo el haz sobre su superficie. El haz de láser emerge a través del cristal (*derecha*). Esta experiencia fue llevada a cabo por Feinberg y Robert W. Hellwarth.

6. TURBULENCIA ATMOSFERICA compensada mediante conjugación de la fase óptica. Los impactos que produce el haz de un láser que haya recorrido una distancia de 100 metros en el aire libre están muy distorsionados y varían con el espacio y el tiempo (*secuencia de las tres primeras fotografías empezando por la izquierda*). La turbulencia que origina estas distorsiones es también la causante del parpadeo de las estrellas y de las ondulaciones aparentes de los objetos cuando se observan sobre un calentador, o en una calle asfaltada una tarde calurosa. Cuando el haz con la fase conjugada atraviesa de nuevo la atmósfera, se recupera la calidad del impacto (*derecha*). Estas fotografías procesadas por vídeo y codificadas en el color fueron obtenidas con una exposición de 1/2000 segundos. Gilmore Dunning y Richard Lind, de los Laboratorios de Investigación Hughes, llevaron a cabo este ensayo utilizando un láser sincronizable.

frey O. White (en aquel entonces en el Caltech) y Yariv en el año 1980, y durante ese mismo año, y de forma independiente, por S. G. Odulov y M. S. Soskin, del instituto de física de la Academia de Ciencias de Ucrania, en la URSS. El método se basa en el mezclador de cuatro ondas. Los tres haces de entrada en el mezclador (es decir, el haz de prueba y los dos de bombeo) pasan a través de las transparencias cuyas imágenes se desea comparar. La figura que forma el haz de salida resultante pone de manifiesto el solapamiento entre las imágenes de las transparencias, caso de que exista. Por ejemplo, en el experimento de White y Yariv, una de las diapositivas tenía grabadas las letras *C-A-L-T-E-C-H* y la otra tenía grabada la letra *C*. La salida del sistema consistía en dos puntos brillantes, cada uno de los cuales "señalaba" a una de las dos presencias de la letra *C* en la citada tira de caracteres.

Memoria asociativa

En el diseño de un dispositivo ideal de reconocimento de imágenes, se hace uso implícito de la suposición de que la letra a comparar se ajusta perfectamente a una de las letras existentes en la tira de caracteres. ¿Qué sucedería si la letra patrón difiriera un tanto de la letra problema? Vamos a suponer, por ejemplo, que las letras en cuestión están escritas utilizando tipos diferentes (por ejemplo, el gótico y el romanillo) o que una de las letras, o las dos, están borrosas o, incluso, han perdido algunos de sus trazos. Estos ejemplos revisten especial interés, pues corresponden a casos reales de la experiencia cotidiana: el punto de partida es una imagen incompleta y la técnica utilizada consiste en un complejo proceso conocido por memoria asociativa.

Teuvo K. Kohonen, de la Universidad de Helsinki, y más recientemente John J. Hopfield, del Caltech, han desarrollado otros tantos modelos de memoria asociativa que pueden llevarse a la práctica utilizando sistemas que contienen espejos conjugadores de fase. Estos modelos podrían proporcionar información acerca del funcionamiento de las redes nerviosas del cerebro. La idea básica consiste en un algoritmo matemático que, en esencia, compara una cadena de datos de entrada con otra cadena almacenada en la memoria, genera una nueva versión de la cadena de datos y repite el proceso otra vez con la nueva versión como entrada (proceso iterativo). La comparación, selección y retroalimentación se repite hasta que las cadenas de entrada y salida convergen, es decir, hasta que coinciden una con otra. Muchos grupos de investigación, entre los que se incluyen los dirigidos por H. John Caulfield, de la Universidad de Alabama, Demetri Psaltis, del Caltech, A. D. Fisher, del Laboratorio de Investigación Naval de los Estados Unidos, y A. A. Vedenov, del Instituto de Energía Atómica Kurchatov, de la Unión Soviética, han desarrollado técnicas electrónicas (ordenadores) y técnicas electroópticas para llevar a cabo este proceso.

Más recientemente, Bernard H. Soffer, Dunning, Yuri Owechko y Emanuel Marom, todos ellos en los laboratorios de investigación Hughes, e independientemente Dana Z. Anderson, del Laboratorio de Astrofísica de Colorado, han desarrollado arquitecturas para memorias asociativas totalmente ópticas. El esquema de Hughes utiliza un holograma estático convencional para almacenar la información en la memoria y espejos conjugadores de fase que proporcionen la correspondiente retroalimentación de imágenes [*véase la figura 7*]. En su estructura física este dispositivo consiste en un resonador dotado de un espejo conjugador de fase en cada uno de sus extremos. El elemento de memoria holográfico se coloca en el interior de la cavidad del resonador. Uno de los espejos conjugadores de fase tiene un umbral característico que le permite seleccionar aquellos elementos almacenados en la memoria que comparten más rasgos con los de una determinada imagen de entrada, para proceder a la iteración siguiente.

Aunque los ordenadores digitales pueden llevar a cabo el procesado de imágenes y las funciones de memoria asociativa, realizan este trabajo en pasos discretos. El método óptico ofrece una ventaja: la información relativa a las imágenes puede procesarse de forma paralela. En otras palabras, toda la imagen se procesa al mismo tiempo.

Efectos de frecuencia

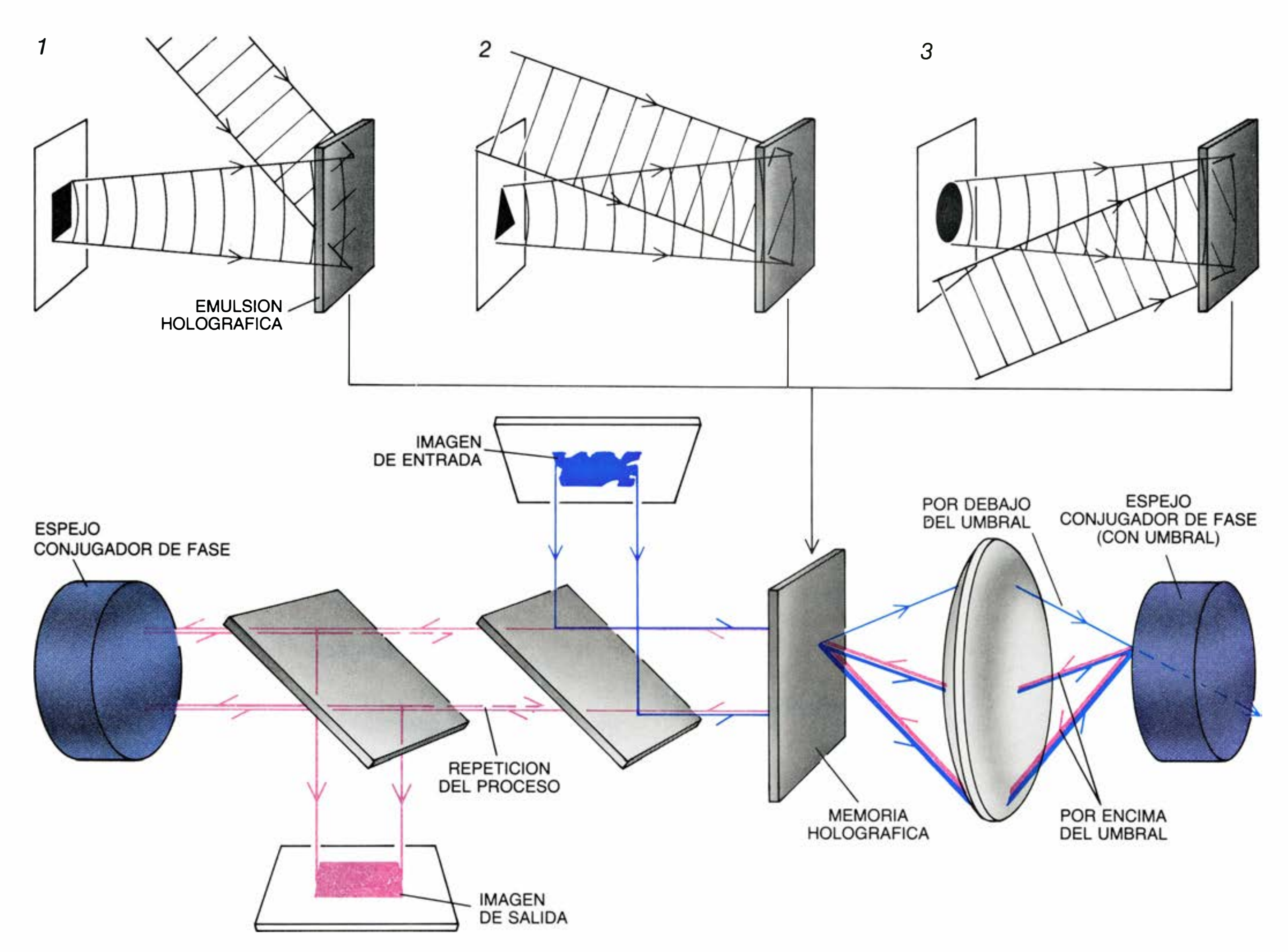
A lo largo del examen de las aplicaciones de la mezcla de cuatro ondas se ha supuesto implícitamente que los tres haces de entrada y el haz de salida tienen la misma frecuencia y longitud de onda. Esta situación se conoce como el caso "degenerado". En 1978, Richard L. Abrams, de Hughes, y el autor analizaron el caso de mezcla de cuatro ondas "casi degenerado", un ejemplo del cual se produce cuando la frecuencia del haz de prueba incidente difiere ligeramente de la frecuencia de los dos haces idénticos de bombeo.

Existen varias situaciones en las que se produce la mezcla de cuatro ondas casi degenerada: en virtud del efecto Doppler, la frecuencia de un haz de prueba reflejado por un satélite en movimiento estaría desplazada, en relación con los haces de bombeo, en un

espejo conjugador de fase con base en la tierra; en un sistema dado pueden utilizarse dos láseres independientes (uno para proporcionar los haces de bombeo y otro para suministrar el haz de prueba) con frecuencias ligeramente diferentes; sobre el espejo conjugador de fase puede incidir un impulso luminoso que consista en una banda continua de frecuencias.

De acuerdo con lo que Yariv, Fekete y el propio autor sugirieron en 1979, la utilización de un espejo conjugador de fase permitiría compensar los efectos de dispersión de los impulsos en los cables de fibra óptica. Estos efectos limitan la velocidad con que puede transmitirse la información a través de un cable, pues impulsos densamente espaciados que se dispersen apreciablemente pueden solaparse entre ellos, haciendo irreconocibles los datos transmitidos. La dispersión se produce en razón del siguiente fenómeno: los diferentes componentes de frecuencia de un cierto impulso viajan con velocidades ligeramente diferentes a través de un material determinado. Si el espejo conjugador de fase de un mezclador de cuatro ondas se coloca en el punto central de un cable de fibra óptica por el que se transmite un impulso, los componentes de frecuencia se reordenarán de forma tal que aquellas frecuencias que se propaguen con velocidades más bajas abandonarán dicho espejo antes que las frecuencias con velocidades más altas. En consecuencia, las frecuencias que se propagan más deprisa alcanzarán a las más lentas en su tránsito a través de la segunda mitad del cable, restableciendo la calidad del impulso al estrecharlo hasta su estado original.

¿Cómo reordena un espejo conjugador de fase las componentes de frecuencia de un impulso? En el caso degenerado, el haz de prueba y uno de los dos haces de bombeo que se propagan en sentidos opuestos dan lugar a una figura de interferencia óptica estacionaria en el medio del mezclador de cuatro ondas. El otro haz de bombeo se refleja en dicha figura y produce el haz conjugado de fase. En el caso casi degenerado, el corrimiento de frecuencia origina un movimiento de la figura de interferencia en el espacio, creando un espejo conjugador de fase móvil en el medio del mezclador de cuatro ondas.



7. CON LA MEMORIA ASOCIATIVA se reconocen dos imágenes que presentan características comunes. Los elementos de almacenamiento de memoria se obtienen iluminando una emulsión fotográfica con un haz de referencia y con la imagen de un cuadrado (*figura del extremo superior izquierdo*), lo cual crea un holograma, o figura de interferencia, sobre dicha película. Este proceso se repite sobre la misma emulsión con un triángulo y con un círculo. El ángulo de incidencia del haz de referencia se modifica en cada caso con el fin de poder distinguir las respectivas imágenes. A continuación, la emulsión fotográfica –convertida en un elemento de memoria holográfica– se revela y se coloca entre dos espejos conjugadores de fase (*figura inferior*). La imagen sometida a tratamiento (*el cuadrado imperfecto que se representa en la figura*) se refleja en un espejo semitransparente y se envía sobre la emulsión (*azul*). Cada vez que un rayo de luz procedente del cuadrado imperfecto coincide con un rayo procedente de uno de los hologramas almacenados en la emulsión, se produce un rayo de salida intenso (*línea gruesa*); si los rayos no coinciden, la señal de salida es más débil (*líneas normal y delgada*). Los rayos de salida normal e intenso se reflejan en el espejo conjugador de fase de la derecha (*rojo*). Sin embargo, los rayos más débiles no poseen la energía suficiente para producir la conjugación y, en consecuencia, atraviesan el espejo conjugador de fase (*rayo azul de la derecha*). Se seleccionan así las características del cuadrado en cuestión. El proceso se repite, una vez que los rayos de salida intenso y normal se han conjugado de nuevo mediante el espejo conjugador de fase de la izquierda. Las iteraciones sucesivas proporcionan la imagen de un cuadrado como señal de salida. En otras palabras, el sistema "ha reconocido" que la imagen de entrada constituía un cuadrado imperfecto.

Como resultado de este proceso, cuando el otro haz de bombeo se refleja en él, su frecuencia experimenta un desplazamiento Doppler (de la misma forma con que cambia la frecuencia del silbido de una locomotora al pasar frente a un observador en reposo). La conservación de la energía exige que el corrimiento de la frecuencia del haz conjugado en relación con los haces de bombeo sea de la misma magnitud que el corrimiento de frecuencia del haz de prueba, aunque de signo opuesto; la distribución de frecuencias de la onda de prueba queda "alterada" simétricamente.

Modificando las frecuencias de los diferentes haces que interaccionan en un espejo conjugador de fase, puede obtenerse también un filtro óptico reflector de banda estrecha. Estos filtros bloquearán (es decir, no conjugarán ni reflejarán) todas las frecuencias, salvo las situadas en una banda muy estrecha, cuya anchura puede llegar a ser la diezmillonésima parte del valor de la frecuencia óptica. En cambio, una simple pieza de vidrio coloreado constituye un filtro cuya banda de paso es relativamente ancha: este filtro deja pasar la luz cuya frecuencia está situada en una banda cuya anchura es del orden de la centésima parte de la frecuencia óptica. Las propiedades reales del filtro dependen de la geometría del espejo conjugador de fase y de la naturaleza del medio no lineal utilizado. Así, el filtro no funcionará, a menos que los átomos del medio respondan con la suficiente rapidez a la figura de interferencia en movimiento. Los filtros de conjugación de fase de banda estrecha fueron propuestos por Abrams y el autor de este artículo en el año 1978; en la actualidad, estos filtros se construyen en varios laboratorios utilizando diferentes medios no lineales y fuentes de láser. Aunque se cree que en el futuro dichos filtros podrían sustituir a los modelos convencionales utilizados en los satélites y en otros sistemas de comunicación, hoy por hoy son mera curiosidad.

Dispositivos de dominio temporal

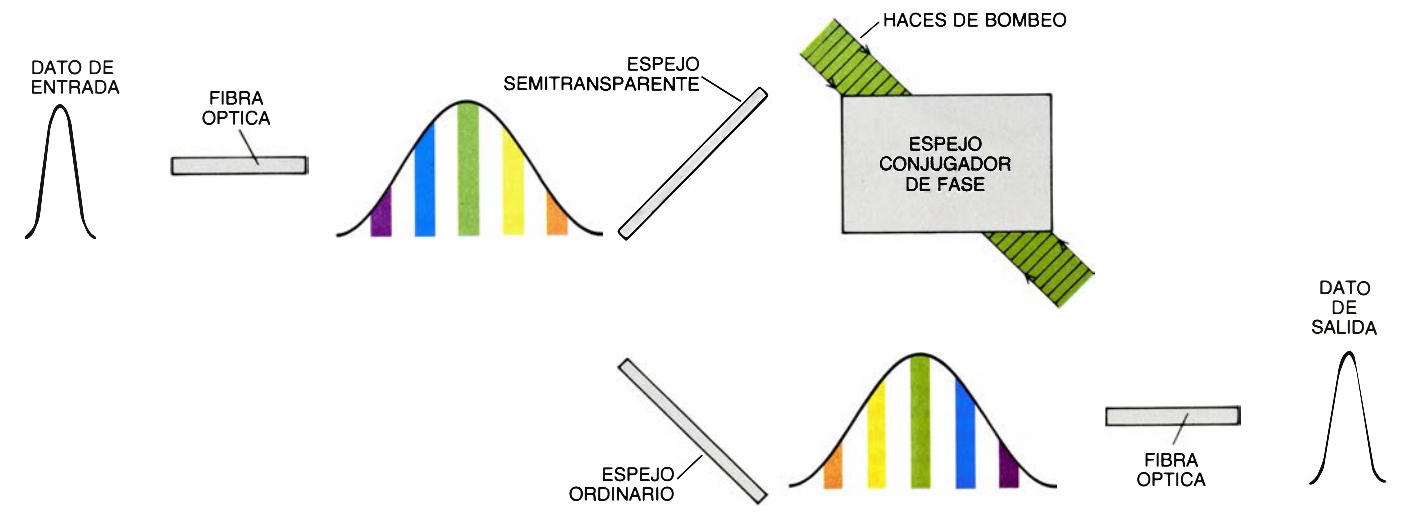
Otra técnica importante de procesamiento de información se basa en la conversión en pulsantes de uno o más de los haces ópticos que interaccionan en un mezclador de cuatro ondas, con el fin de poder codificar los mensajes. Tales sistemas se podrían utilizar para comunicar de forma eficaz con un satélite. Un espejo conjugador de fase puede generar una onda reflejada solamente en el caso de que tanto el haz de prueba como los dos haces de bombeo estén iluminando el medio no lineal. En consecuencia, encendiendo o apagando uno o más haces se puede controlar la reflexividad del espejo y codificar un mensaje en el haz conjugado de salida.

Supongamos que un satélite artificial está equipado con un láser de baja potencia. Supongamos, además, que este láser de prueba se dirige hacia una estación terrestre dotada de un amplificador de láser y de un espejo conjugador de fase con mezclador de cuatro ondas. Si el conjugador está codificado para impulsos, no sólo compensará la turbulencia atmosférica y las distorsiones del amplificador, sino que devolverá también un mensaje codificado al satélite. Además, bajo condiciones adecuadas, el sistema permite localizar el movimiento de la nave espacial.

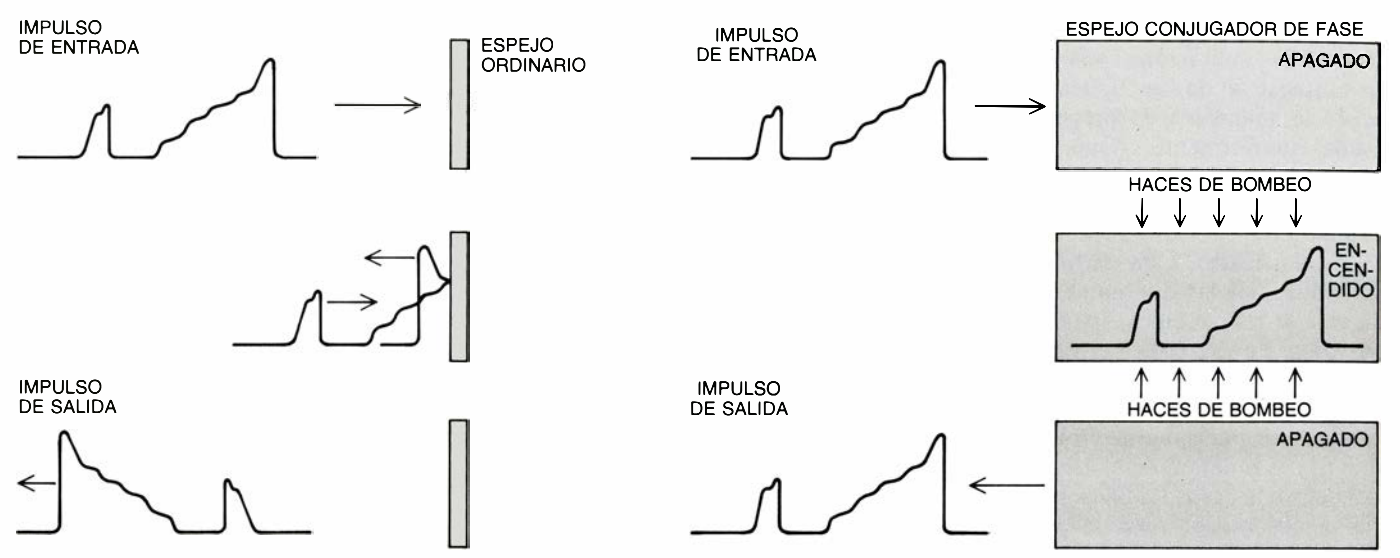
Un espejo conjugador de fase puede, asimismo, invertir una secuencia temporal de impulsos de forma tal que la última parte de la secuencia que entra en el dispositivo sea la primera en abandonarlo. El dispositivo de inversión de una secuencia de impulsos fue propuesto, independientemente, por David A. B. Miller, en aquel entonces en la Universidad Heriot-Watt, de Edimburgo, O'Meara y Yariv. Este sistema podría tener consecuencias importantes en la investigación de la fusión por láser.

Supongamos que un espejo conjugador de fase es lo suficientemente largo como para que una secuencia de impulsos quepa espacialmente en el correspondiente medio no lineal. (Por ejemplo, un impulso cuya duración fuera igual a una mil millonésima de segundo exigiría un espejo conjugador de fase de unos 30 centímetros de longitud.) Cuando toda la secuencia de impulsos está contenida en el medio, se actúa sobre el espejo conjugador de fase activando los dos haces de bombeo que se propagan en sentidos opuestos. Una vez se han activado dichos haces, la porción de la secuencia de impulsos que haya entrado en último lugar en el medio será la que lo abandone en primera instancia.

O'Meara ha combinado las propiedades del dispositivo de inversión de una secuencia de impulsos con un sistema de compensación de doble paso. En este sistema, un haz conjugado de fase se propaga hacia atrás a través del medio para compensar las distorsiones.



8. RECOMPOSICION DE UN IMPULSO ensanchado temporalmente mediante un espejo conjugador de fase. El ensanchamiento tiene lugar debido a que los componentes de frecuencia (*representados aquí con colores distintos*) que constituyen un impulso se propagan con velocidades ligeramente diferentes a través del espacio. Si se coloca un espejo conjugador de fase por mezcla de cuatro ondas (bombeado con la frecuencia central del impulso) en la mitad de camino de un cable de fibra óptica que transmite el impulso, dicho impulso se reestructurará de forma tal que las componentes más lentas entrarán las primeras en la segunda mitad del cable. Cuando el impulso conjugado de fase se propaga a lo largo del resto del cable, las componentes del impulso que se mueven con mayor velocidad dan alcance a las que avanzan más despacio. En consecuencia, el impulso se reestrecha y el cable de fibra óptica transmite más información.



9. INVERSION TEMPORAL de la secuencia de un impulso; se obtiene con un espejo conjugador de fase. Un espejo ordinario (*esquema de la izquierda*) mantiene la ordenación temporal de la secuencia de un impulso en una reflexión. Un espejo conjugador de fase (*esquema de la derecha*) invertirá la ordenación temporal si el espejo actúa cuando todo el impulso está en su interior. La actuación del espejo se controla con ayuda de dos haces de referencia o de bombeo.

Dicho autor ha propuesto también un sistema que podría sincronizar simultáneamente los impulsos procedentes de una cadena de amplificadores láser dispuestos en una configuración en paralelo. El sistema podría iluminar una célula de fusión y compensar las distorsiones ópticas introducidas en el proceso, lo cual redundaría en un aumento del rendimiento del proceso.

La posibilidad de codificar temporalmente los diferentes haces de forma independiente permite realizar también otro tipo de procesadores totalmente ópticos: los convolucionadores y correlacionadores del dominio temporal. A título de ejemplo, el correlacionador (propuesto por O'Meara y Yariv) consiste, a grandes rasgos, en un análogo temporal del dispositivo de reconocimiento de imágenes de dominio espacial en tiempo real y, por tanto, está capacitado para reconocer una secuencia de impulsos dada. Otras variaciones de estos procesadores permiten codificar y decodificar mensajes con rapidez. Todos estos dispositivos de dominio temporal podrían utilizarse en sistemas de procesamiento de señales, radares e instrumentos ópticos.

Govind P. Agrawal y Christos Flytzanis, de la compañía francesa Quantel, han sugerido que la conjugación de fase serviría también para controlar el estado de los elementos lógicos de tipo óptico que constituyen el núcleo de los posibles ordenadores ópticos. Un elemento lógico óptico podría consistir en haces propagándose en sentidos opuestos en un medio no lineal, es decir, un dispositivo parecido a la configuración de los haces de bombeo en un mezclador de cuatro ondas. Por tanto, si un haz de prueba se dirigiera de forma adecuada sobre dicho elemento lógico, sería conjugado y su lectura permitiría determinar el estado lógico. El haz de prueba no afectaría a la operación ni modificaría el estado lógico del elemento de memoria.

Estudios fundamentales

El descubrimiento de la conjugación de fase óptica ha unificado muchos campos de la óptica física fundamental y aplicada. La espectroscopía, es decir, el estudio de la interacción de la materia y la radiación, se ha beneficiado considerablemente de esta técnica. En esta operación, el dispositivo experimental se modifica: los tres haces de entrada (el haz de prueba y los dos de bombeo) se utilizan ahora para investigar las propiedades del propio medio no lineal. Por ejemplo, puede explorarse la física y la espectroscopía de los procesos de mezcla de cuatro ondas midiendo la intensidad del haz conjugado de fase en función de parámetros tales como la polarización, la frecuencia, la intensidad y el ángulo de incidencia de los haces de bombeo y de prueba, la presión del gas de reserva (en el caso de un medio gaseoso) y la intensidad de los campos eléctricos y magnéticos aplicados.

El empleo de estas técnicas en medios no lineales tales como vapores atómicos, aerosoles, cristales fotorrefractivos y diversos compuestos orgánicos, proporciona otra fuente de pormenorizada información acerca de los procesos fundamentales atómicos y mecánico-cuánticos. Aunque el campo de la espectroscopía de láser existe desde hace muchos años, la geometría conjugada de fase constituye una herramienta nueva para investigar la interacción entre luz y materia.

Por otra parte, las propiedades óptico-cuánticas de las interacciones que dan lugar a haces conjugados de fase pueden ser útiles para producir nuevos tipos de detectores ultrasensibles, quizá lo suficientemente sensibles como para detectar las ondas gravitacionales o recorrer una línea telefónica de fibra óptica. Aunque el desarrollo de estas técnicas se encuentra todavía en su infancia, la investigación que en este campo se está llevando a cabo es de orden internacional.

Las nociones, técnicas y aplicaciones básicas de la conjugación de fase óptica pueden extenderse, en principio, a la mayoría de las restantes áreas del espectro electromagnético. Esto puede abrir las puertas a la conjugación de fase de microondas, por ejemplo, con aplicaciones obvias en los campos del radar, sistemas de formación de imágenes con ondas milimétricas y procesamiento de señales temporales de alta frecuencia, así como en espectroscopía de microondas.

Respuestas y preguntas

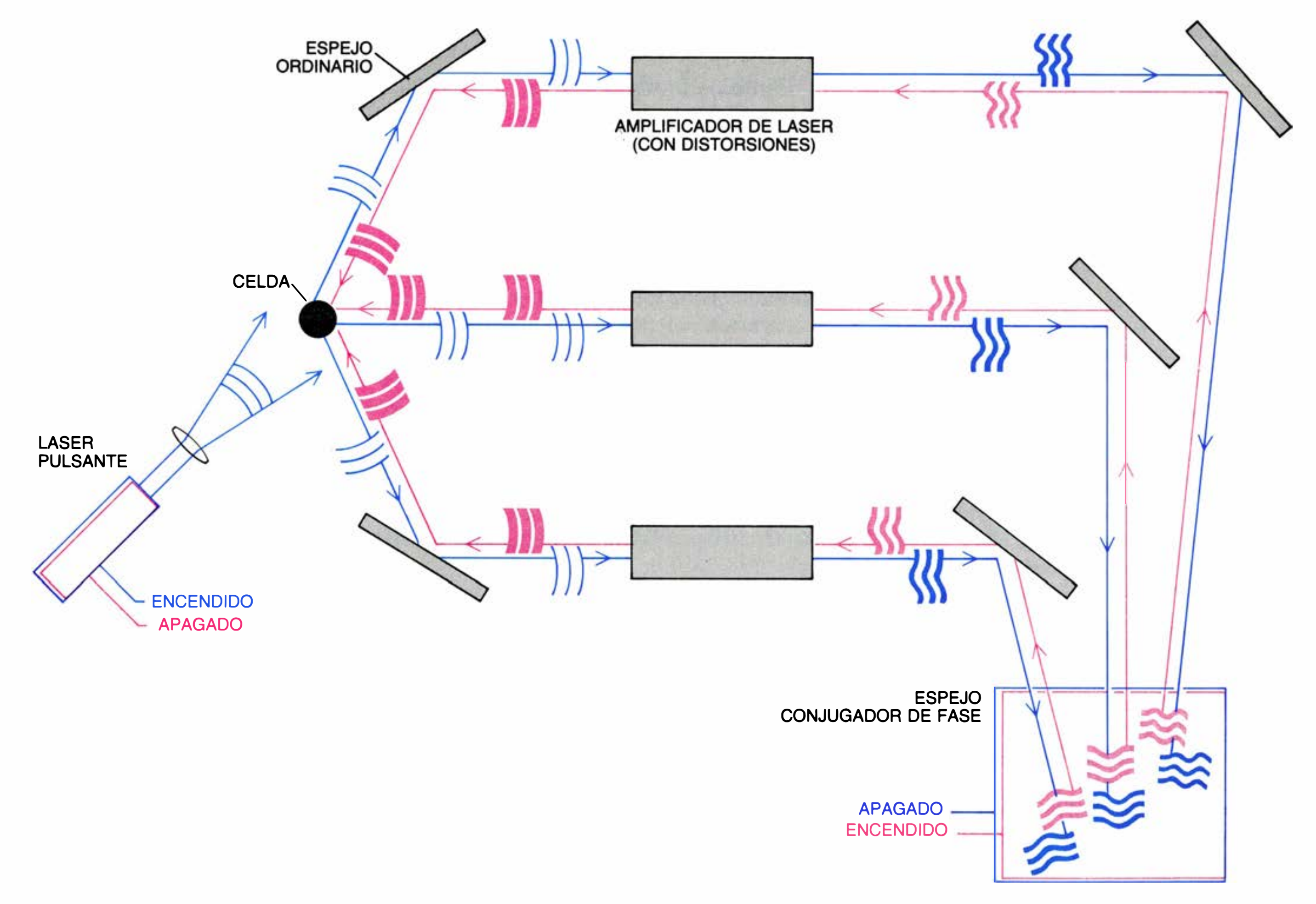
Diferentes grupos de investigación de los Estados Unidos y la Unión Soviética están tomando también en consideración como candidatos a los fonones (ondas sonoras), en experimentos de conjugación de fase. Los sistemas de procesamiento de señales de ondas acústicas y el sonar son dos de los campos que se podrían beneficiar de tales estudios. Esta tecnología se podría utilizar, en última instancia, en la detección y seguimiento de submarinos.

Ahora que el lector ya conoce muchas de las aplicaciones potenciales de la conjugación de fase óptica, va a obtener la solución a la pregunta planteada anteriormente. ¿Qué es lo que vemos cuando nos miramos en un espejo conjugador de fase? En un espejo ordinario una persona ve, obviamente, su propio rostro. Una parte de la luz difundida por las diferentes partes de su cara se refleja en el espejo y llega a sus ojos. Por su parte, el espejo conjugador de fase dirigiría toda la luz difundida por la cara hasta sus puntos de origen. Por tanto, la luz difundida por la nariz se reflejará en el espejo y será devuelta a la nariz. La única luz que vería el observador sería la correspondiente a la iluminación que difunde la córnea, incide sobre el espejo conjugador de fase y vuelve al ojo. En otras palabras, el observador vería un espejo uniformemente iluminado, sin detalles evidentes. Sin embargo, una segunda persona que mirara directamente al observador (es decir, no mediante el espejo) vería la cara del observador iluminada por la acción del espejo conjugador de fase.

Una curiosidad intrigante

Como cuestión puramente especulativa con la que concluir, señalaré una curiosidad intrigante. La dualidad onda-partícula de la luz y la materia plantea la cuestión de si la propagación de materia puede invertirse. Las interacciones ópticas no lineales que conducen a la conjugación de fase se basan en efectos estimulados y quedan restringidas a las partículas conocidas como bosones, en virtud del principio de exclusión de Pauli. Los bosones son partículas cuyo espín es un número entero. (El espín es un parámetro de la teoría cuántica.) Así, los fotones o cuantos de luz tienen espín 1 y, por tanto, son bosones. Por otro lado, los electrones, protones, neutrones y ciertas partículas elementales inestables son fermiones, o partículas con espines semienteros; así pues, el principio de exclusión de Pauli les prohíbe tomar parte en interacciones estimuladas. Muchas clases de bosones, como los núcleos de helio-4 (constituidos por dos protones y dos neutrones), los pares de Cooper (cuasi-partículas electrón-positrón existentes en los superconductores) y ciertas partículas de vida corta (piones y kaones), pueden tomar parte, en principio, en interacciones de inversión temporal onda-materia.

Los superfluidos y los superconductores pueden ser medios adecuados para tales interacciones. Sin embargo, la realización de estas interacciones es tan sólo una posibilidad remota, si recordamos la debilidad de la mayoría de las interacciones partícula-partícula y partícula-fotón, la necesidad de contar con un haz intenso y no distorsionado para observar los efectos pertinentes y la corta vida media de muchos bosones. Aunque era teóricamente conocido el campo de la óptica no lineal (base de la conjugación de fase óptica), antes de la invención del láser tratábase de algo puramente hipotético y su viabilidad se descartaba en la práctica.



10. UN SISTEMA DE AMPLIFICACION PARALELA podría utilizarse para iniciar un proceso de fusión. Una celda de fusión se ilumina mediante un láser pulsante de baja frecuencia (*azul*). Los impulsos difundidos por la celda atraviesan los tres amplificadores de láser en paralelo que se representan en la figura. La intensidad de los impulsos individuales aumenta, pero lo hace a expensas de introducir distorsiones. A continuación, los impulsos se dirigen hasta un espejo conjugador de fase con mezclador de cuatro ondas. Cuando dichos rayos llegan al espejo, han quedado desfasados, al haber recorrido distancias diferentes. Cuando todos los impulsos están dentro del espejo, se produce su conjugación y se invierte su orden temporal relativo (*rojo*). En el camino de vuelta, las distorsiones desaparecen y los impulsos se sincronizan. En consecuencia, un impulso intenso incide sobre la celda de fusión. (Recreación de Ian Worpole.)

Depósitos minerales creados por fuentes termales submarinas

El agua marina que circula a través de roca volcánica fracturada emplazada sobre fuentes de calor experimenta intercambios químicos con la roca. Importantes depósitos minerales, algunos emergidos, derivan de ese proceso

Peter A. Rona

Cuando la teoría de la tectónica de placas alcanzó la aceptación general, hace de ello unos 15 años, trajo consigo buenas, y lo que entonces parecieron ser malas, noticias. Las buenas eran que se explicaba la dinámica de la tierra: los continentes se mueven continuamente y las cuencas oceánicas se abren y se cierran, mientras se crea corteza oceánica nueva por expansión del fondo marino y se destruye corteza oceánica vieja por su reasimilación en el interior de la tierra. Las noticias aparentemente malas estribaban en que la juventud y composición homogénea de la corteza oceánica recién formada parecían excluir la posibilidad de formación de depósitos importantes de metales en las cuencas oceánicas. El reciente descubrimiento de manantiales termales, ricos en metales, asociados a depósitos minerales submarinos ha alterado el cuadro. El hallazgo quizá conduzca en última instancia a la explotación minera del mar a escala comercial. También aclara el origen de algunos de los principales yacimientos minerales emergidos.

El viejo modelo de tierra estática concebía las cuencas oceánicas como pasivos sumideros del material meteorizado en los continentes y transportado a los océanos, principalmente por ríos. Este modelo explicaba sólo los yacimientos minerales submarinos entonces conocidos: de oro, estaño, titanio, diamantes y otros materiales pesados, erosionados mecánicamente de afloramientos rocosos emergidos y concentrados en bolsadas sobre el fondo marino por agua corriente, así como yacimientos de fosforita y manganeso precipitados químicamente en forma de nódulos y costras a partir de materiales disueltos en agua marina.

Al desarrollarse el modelo de la tectónica de placas, que presentaba una tierra dinámica, resultó evidente que las propias cuencas oceánicas eran fuente de calor y metales. Los metales aparecen en un proceso de intercambio entre el océano y la corteza oceánica, capaz de concentrar minerales metálicos en yacimientos.

Esos yacimientos no podrían formarse de no ser porque la corteza oceánica se encuentra fracturada. Se rompe la corteza porque se contrae a medida que se enfría, al pasar del estado fundido en que mana a estado sólido. El movimiento de la corteza cuando se forma en los centros de expansión, y la presión de los fluidos, aumentan ese efecto. De ese modo se favorece la penetración de agua marina en la corteza, de un grosor característico de seis kilómetros, hasta el manto subyacente. En aquellos puntos de la corteza, o debajo de ella, donde existan fuentes de calor, se generará una circulación convectiva de agua a través del fondo marino, que es permeable. (En la convección, el calor lo transporta un fluido, que tanto puede ser aire como agua.) En un sistema de convección ubicado en el fondo del mar se registra un descenso de agua marina fría y densa a través de la corteza oceánica permeable asociada a una fuente de calor. El agua se caldea y asciende. Ese tipo de sistemas, en los que se produce una circulación convectiva de soluciones calientes y acuosas (hidrotermales), favorece de manera eficaz los intercambios térmicos y químicos entre el océano y la corteza oceánica.

Las principales fuentes de calor son cámaras que contienen magma, roca fundida. También generan calor algunas reacciones químicas entre el agua marina y determinados constituyentes de la roca del manto. Otra fuente de calor es el gradiente geotérmico: el aumento de la temperatura de la Tierra con la profundidad, principalmente debido a la disipación de calor por la desintegración radiactiva de elementos de la corteza y el manto.

En las cuencas oceánicas se encuentran por doquier agua marina y corteza oceánica fracturada, pero las fuentes de calor capaces de conducir convectivamente agua marina a través de la corteza están localizadas. Se encuentran principalmente donde la roca fundida se separa del manto y penetra en la corteza en forma de cámaras magmáticas. Se distribuyen éstas a lo largo de los bordes que segmentan la litosfera terrestre, o capa exterior rígida, en 10 placas grandes y muchas otras menores. También hay cámaras de magma bajo regiones volcánicas situadas en zonas más interiores de las placas, lejos de los bordes; ejemplo de ello son las islas Hawai, ubicadas en el interior de la placa del Pacífico.

Impresiona la magnitud del intercambio térmico y químico que se produce, por circulación convectiva, entre la corteza oceánica y el agua en los bordes de placa; Thomas J. Wolery y Norman H. Sleep, de la Universidad del Noroeste, la calcularon. Supusieron que la diferencia entre la cantidad estimada de calor liberado en los centros de expansión del fondo marino (los bordes donde divergen las placas) por creación de corteza oceánica y el promedio de flujo de calor a través de los

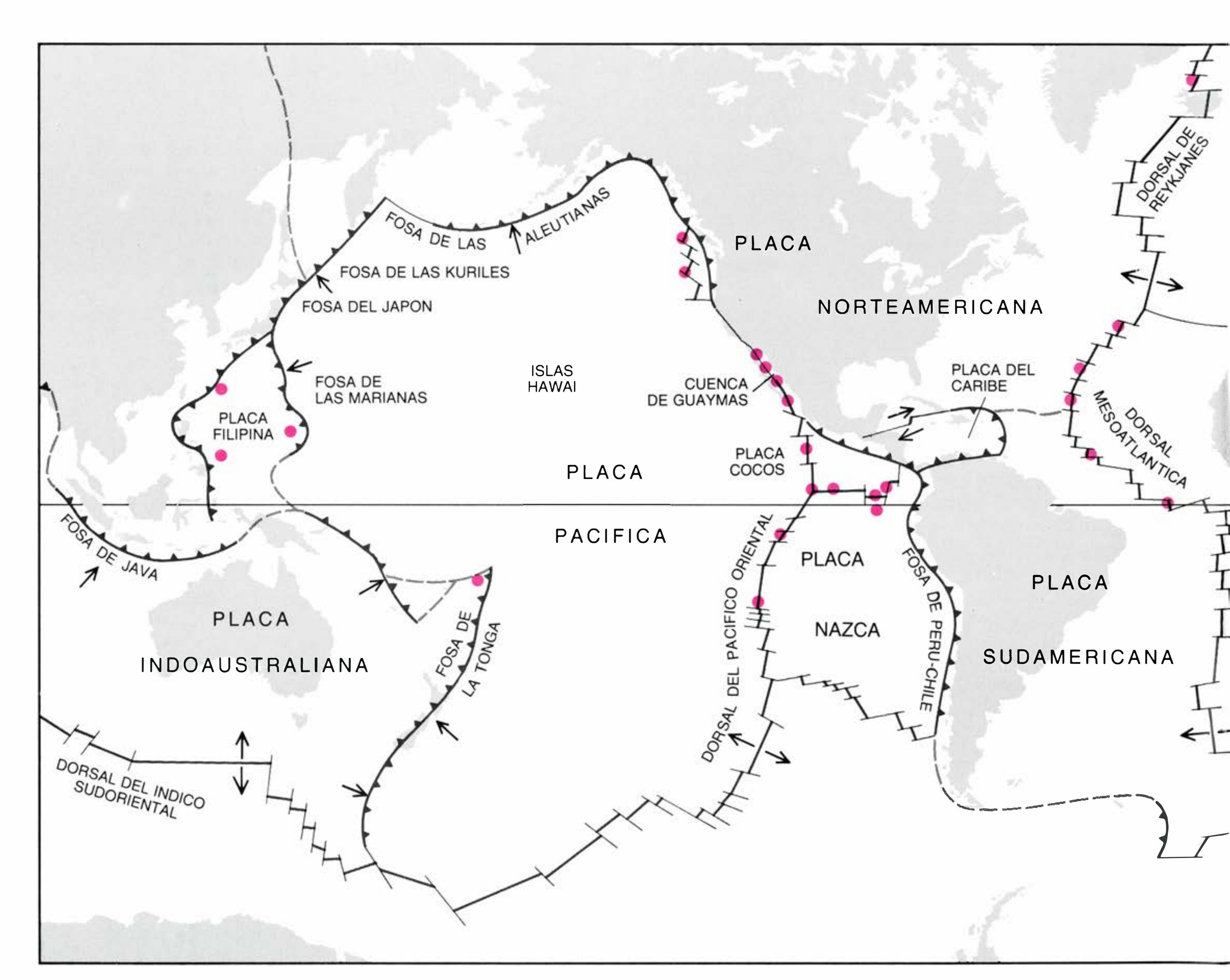
1. CHIMENEA DE FONDO MARINO de varios metros de altura en la dorsal del Pacífico oriental. Arroja agua caliente, precipitándose partículas de sulfuros de hierro, cobre y cinc asimilados en reacciones químicas con rocas fracturadas de la corteza oceánica. Los investigadores que descubrieron esos accidentes, en 1979, los llamaron humeros negros, dado su parecido con las chimeneas. La fotografía la obtuvo Kyung-Ryul Kim.



materiales del suelo marino cabía atribuirlo al enfriamiento por la circulación convectiva de agua marina. Calcularon que toda la masa de los océanos circula por la corteza en dorsales oceánicas cada 10 millones de años. En términos anuales, el caudal es comparable al del río Amazonas.

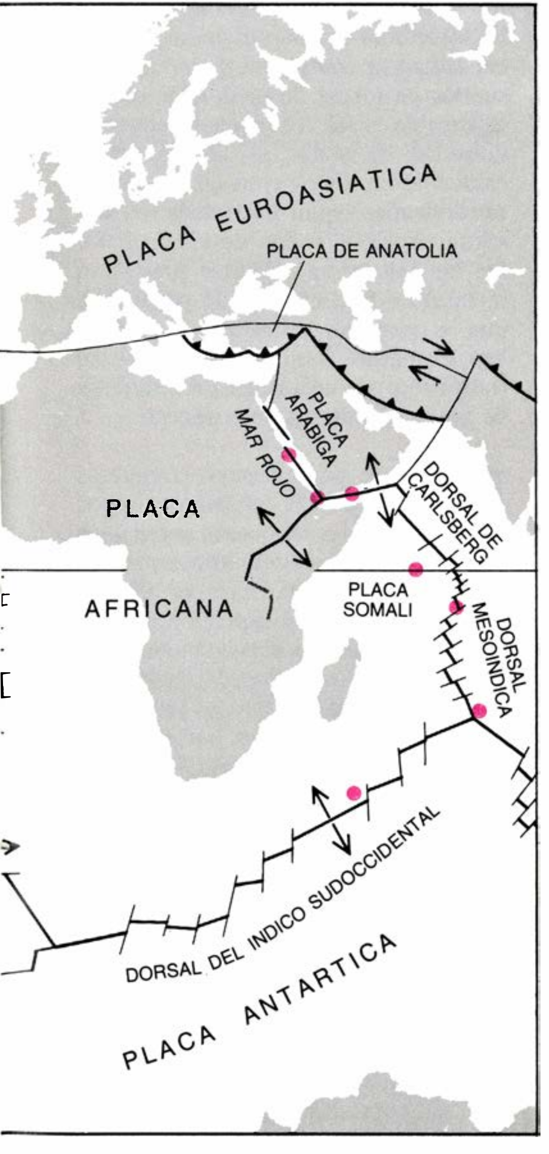
Cuando a través de la corteza oceánica circula por convección agua marina muy caliente se produce un intercambio químico en dos direcciones. Ciertos elementos y compuestos, en particular magnesio y sulfato, pasan del agua a la corteza. Otros elementos, en especial determinados metales alcalinos, como el litio y el potasio, alcalinotérreos, como el calcio y el bario, y metales de transición, como cobre, hierro, manganeso y cinc, se disuelven de la corteza y pasan al agua marina circulante, convirtiéndola en una solución cargada de metales. John M. Edmond y sus colaboradores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, determinaron que la magnitud de algunos de esos intercambios es comparable al aporte de esos mismos elementos y compuestos por parte de los ríos que acarrean materiales meteorizados de los continentes a los océanos.

No basta la presencia de un fluido circulante: deben darse condiciones físicas y químicas anómalas para que surjan sistemas de convección hidrotermal formadores de menas que concentren depósitos minerales. Entre las condiciones físicas se cuentan: (1) altos gradientes térmicos que impulsen con vigor el flanco ascendente del fluido en circulación convectiva; (2) una combinación de baja permeabilidad en la zona de intercambio de calor (para mantener la temperatura de la solución a varios centenares de grados Celsius) y de pequeñas zonas con gran permeabilidad, para canalizar el flujo ascendente y concentrar la descarga a través de una capa suprayacente impermeable, un casquete rocoso, de modo que los depósitos, en lugar de dispersarse, se concentren; (3) movimientos corticales que creen una distribución adecuada de zonas permeables; (4) inyecciones de magma que rellenen la cámara magmática que imprime energía a la circulación hidrotermal, y (5) actividad volcánica o sedimentación continuas que sepulten un yacimiento mineral de fondo marino y lo protejan de la oxidación y la desintegración.



2. DEPOSITOS MINERALES formados por manantiales termales de fondo marino, señalados por círculos de color en este mapa. Las condiciones necesarias para la creación de tales depósitos son la presencia de agua marina como fluido metalogénico, roca volcánica fracturada, o sedimento, como medio permeable y fuente de metales, y una cámara magmática como fuente de calor. Se dan condiciones favorables en los puntos ubicados a lo largo de los bordes de las

¿Cómo es el ambiente químico que facilita la disolución de metales de la corteza y su transporte, precipitación y concentración en un depósito marino? Agua del mar fría, densa, alcalina, oxidante y pobre en metales desciende por la corteza permeable, asimila calor al fluir cerca de una cámara magmática y asciende en el flanco de afloramiento. Mientras sube por la corteza, el agua marina térmicamente expandida participa en reacciones químicas bidireccionales con las rocas contiguas. El magnesio procedente del agua se combina con hidróxido y sílice, formando fases minerales en la corteza. La reacción se acompaña de liberación de iones hidrógeno, que imprimen acidez a la solución. El sulfato (SO_4) del agua marina se reduce a azufre por reacción con el hierro ferroso de la roca volcánica y



placas que constituyen la litosfera (la capa externa rígida de la Tierra) y en regiones volcánicas del interior de placas, como es el caso de las islas Hawai.

forma ácido sulfhídrico (H_2S). Resulta una solución ácida que disuelve agresivamente los metales de la corteza oceánica, presentes en concentraciones muy bajas (del orden de partes por mil millones).

Otras fuentes de metales son los fluidos derivados del magma y los elementos volátiles procedentes del manto (antimonio, arsénico, mercurio y selenio). Los metales se transportan, principalmente en forma de complejos de cloro del agua marina original, a concentraciones de una a 100 partes por millón en las soluciones hidrotermales. Ed T.C. Spooner, de la Universidad de Toronto, y William S. Fyfe, de la Universidad de Ontario Occidental, han calculado que el enfriamiento de 350 kilómetros cúbicos de magma calentaría otros 1000 de agua marina circulante (igual a la escorrentía anual del río Changyiang, antes Yangzé) hasta 300 grados Celsius. A una concentración de metales de una parte por millón, esa agua podría depositar un millón de toneladas métricas de metal.

Diversos mecanismos químicos y físicos precipitan los metales disueltos y los concentran en depósitos minerales, tanto a lo largo del trayecto de ascenso a través de la corteza como sobre el fondo del mar, donde las soluciones desaguan en forma de manantiales termales ricos en metales. Los dos mecanismos de precipitación principales son la mezcla y la ebullición.

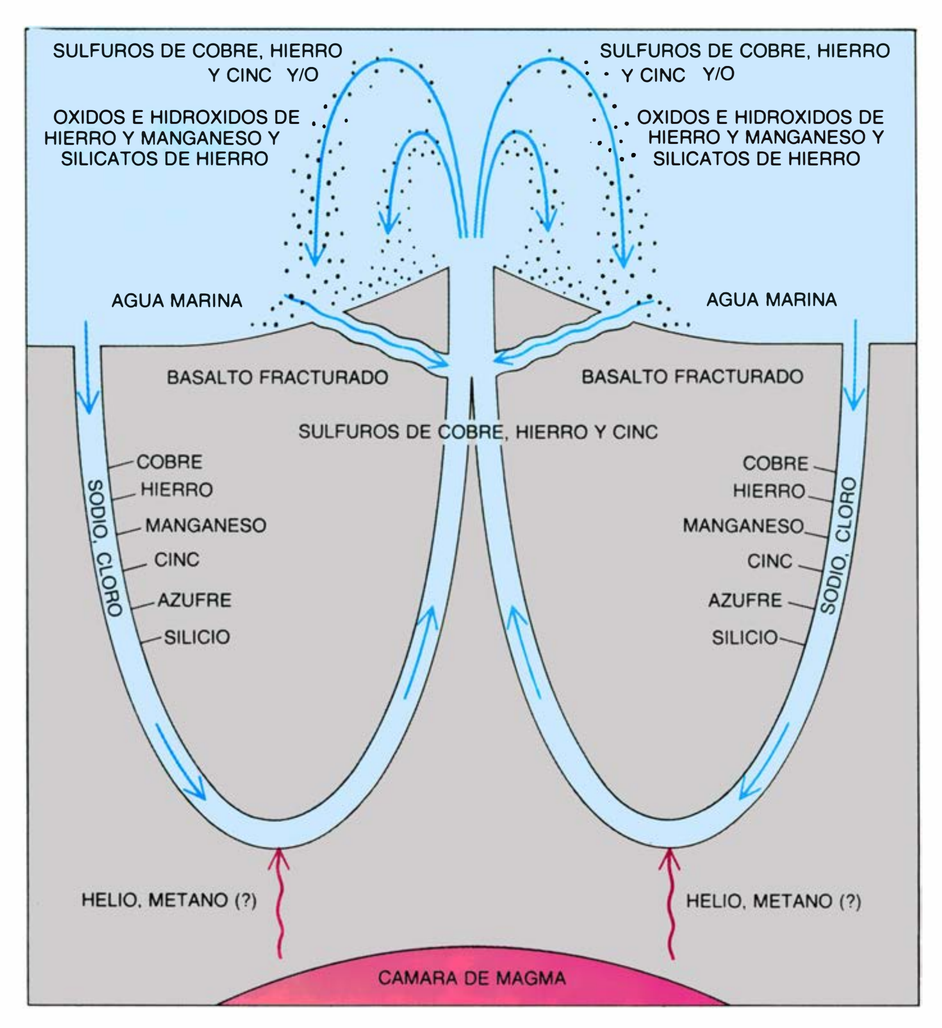
La mezcla de la solución hidrotermal con agua marina normal se produce cuando la presión de confinamiento del agua marina suprayacente impide la ebullición, como sucede si la profundidad supera los 2000 metros y la temperatura del agua es de 350 grados Celsius. Se produce entonces un apagamiento de la solución, que baja de temperatura y pasa de ácida a alcalina. Los minerales metálicos precipitan rápidamente. Bajo condiciones reductoras (ausencia de oxígeno libre) los metales se combinan con azufre extraído del agua marina y disuelto de la corteza, depositándose sulfuros polimetálicos. Bajo condiciones oxidantes los metales se combinan con oxígeno, hidroxilo, sílice, sulfato o carbonato y se depositan óxidos, hidróxidos, silicatos, sulfatos o carbonatos.

La ebullición se produce cuando la presión de confinamiento del agua suprayacente disminuye hasta el punto crítico, lo que suele ocurrir a profundidades inferiores a 2000 metros para una solución a 350 grados Celsius. Una fase líquida provista de cloruro sódico se separa de una fase de vapor que retiene el ácido sulfhídrico. La ebullición puede instar la precipitación de depósitos de sulfuros polimetálicos bajo el fondo del mar o la emanación de una salmuera hipersalina más densa que el agua marina normal.

Las anómalas condiciones físicas y químicas que requieren los sistemas de convección hidrotermal metalogénicos se dan en centros de expansión del fondo del mar que presentan, a la vez, rasgos comunes y diferencias. Todos los centros expansivos muestran una estructura segmentada a lo largo de su eje, compuesto por segmentos lineales de unos 10 kilómetros de longitud que alternan con desencajamientos transversales en zonas de fractura cuya longitud tanto puede ser de unos pocos kilómetros como de centenares. Todos los centros de expansión presentan una zona axial de actividad volcánica de un kilómetro de anchura, aproximadamente, flanqueada por zonas marginales en las que la corteza oceánica generada por expansión en la zona axial se rompe en bloques fallados por movimientos de la corteza.

Los centros expansivos muestran diferencias sistemáticas relacionadas con la tasa de expansión del fondo del mar. Esa expansión, a cada lado del eje, se califica de lenta en el océano Atlántico (crece dos centímetros o menos por año); en otros puntos es intermedia, o rápida, como en el Pacífico. Con el aumento de la tasa de expansión, la diferencia de alturas entre la zona axial y las zonas marginales disminuye (de varios kilómetros a centenares de metros) y la cámara magmática subyacente se ensancha (20 kilómetros en lugar de uno) y se hace más somera (de un kilómetro en vez de seis). Ambos, rasgos comunes y diferencias sistemáticas entre centros de expansión, influyen en la naturaleza de los sistemas hidrotermales metalogénicos.

Gracias a las exploraciones realizadas con buques de investigación oceanográfica de muchos países se está dibujando un cuadro bastante definido de la mineralización del suelo marino en diferentes contextos de expansión del fondo del mar. El proceso de mineralización muestra muchos rasgos comunes y algunas diferencias que dependen del contexto. Algunos puntos del mar Rojo son ejemplo de mineralización en un contexto: una etapa temprana de apertura de una cuenca oceánica, asociada a un centro de expansión



3. PROCESO DE MINERALIZACION representado en un perfil transversal de dos sistemas simétricos de circulación convectiva hidrotermal de un centro expansivo del fondo oceánico. El agua penetra a varios kilómetros de profundidad a través de la corteza fracturada y rica en metales. El calor de la cámara magmática subyacente provoca la expansión y el ascenso convectivo del agua. El agua caliente disuelve muchos de los elementos de la roca, metales incluidos, y pierde otros. De la cámara magmática y del manto subyacente procederían otros metales, junto con helio y posiblemente gas metano. En sistemas "agujereados", el agua marina fresca baja y se mezcla con las soluciones ascedentes calientes, ricas en metales, desencadenando la precipitación de metales, en forma de sulfuros, en la corteza; los metales que permanecen disueltos se depositan en el fondo del mar, tras surgir por los manantiales termales. En sistemas de carácter "hermético", las soluciones desaguan directamente en los manantiales termales que depositan sulfuros en el fondo del mar.

CONSTITUYENTE	BASALTO	AGUA MARINA	DORSAL/RIO
COBRE (Cu)	–	+	
HIERRO (Fe)	–	+	
MANGANESO (Mn)	–	+	1
CINC (Zn)	–	+	
POTASIO (K)	–	+	2/3
LITIO (Li)	–	+	10
RUBIDIO (Rb)	–	+	
BARIO (Ba)	–	+	2/3
CALCIO (Ca)	–	+	1
SILICATO (SiO_4)	–	+	2/3
MAGNESIO (Mg)	+	–	1
SULFATO (SO_4)	+	–	1
SODIO (Na)	+	–	VARIABLE
CLORO (Cl)	?	?	VARIABLE

4. INTERCAMBIO DE PRODUCTOS químicos que se registra entre el agua marina circulante y la roca basáltica de la corteza. Se supone que la temperatura es de 200 a 400 grados Celsius. El signo negativo significa que el basalto o el agua marina constituyen la fuente del elemento o compuesto; el signo positivo indica que son el receptor. La columna de la derecha muestra la razón entre la cantidad de material introducido en los océanos por manantiales termales en las dorsales oceánicas y la cantidad introducida por escorrentía fluvial desde los continentes. En el caso del litio, por ejemplo, las dorsales aportan 10 veces más que los ríos.

lenta que biseca el mar Rojo. Se encuentran en esa zona salmueras ricas en metales, que rellenan varias cuencas situadas a lo largo de la zona axial. Las salmueras resultan de la acción de sistemas metalogénicos de convección hidrotermal en las cuencas. El agua marina fría y densa que desciende por las rocas volcánicas de zonas marginales se saliniza extraordinariamente al atravesar gruesos estratos de sal de roca (cloruro sódico) enterrados en la corteza. Esas capas caracterizan una etapa temprana de la apertura de una cuenca oceánica cuando, bajo condiciones climáticas áridas, la evaporación supera la reposición de agua marina, al verse limitado el aporte desde los océanos exteriores por la presencia de continentes contiguos.

Al aumentar la salinidad precipitan cristales de sal, se decantan y se acumulan en gruesos estratos sobre el fondo del mar. La elevada salinidad de las soluciones circulantes incrementa su capacidad de transporte de metales disueltos en forma de complejos con el cloruro de la sal. También aumenta su densidad, de suerte que las soluciones caldeadas se distribuyen en salmueras estratificadas según la densidad al desaguar desde el fondo de las cuencas. De las salmueras calientes precipitan metales en fase mineral de partículas, que se decantan en las cuencas y quedan atrapados, formando depósitos estratificados de sedimentos metalíferos de hasta 100 metros de potencia.

La aptitud para formar complejos con metales y la estratificación por densidades de las salmueras dotan a los sistemas de convección hidrotermal del mar Rojo de una excepcional eficacia para el transporte y captación de metales. El mayor depósito de metales conocido, entre todos los de centro expansivo del fondo marino, es un cuerpo estratificado de sulfuros polimetálicos presente en el diámetro de siete kilómetros de la hoya Atlantis II, perteneciente a la zona axial del mar Rojo, en aguas de 2000 metros de profundidad al oeste franco de la Meca. Se calcula que el depósito contiene una masa que, seca y sin sal, pesa 100 millones de toneladas métricas, constituida en un 29 por ciento por hierro, del 2 al 5 por ciento de cinc, del 0,3 al 0,9 por ciento de cobre, 60 partes por millón de plata (6000 toneladas métricas a 51 gramos por tonelada) y 0,5 partes por millón de oro (50 toneladas métricas a 0,4 gramos por tonelada).

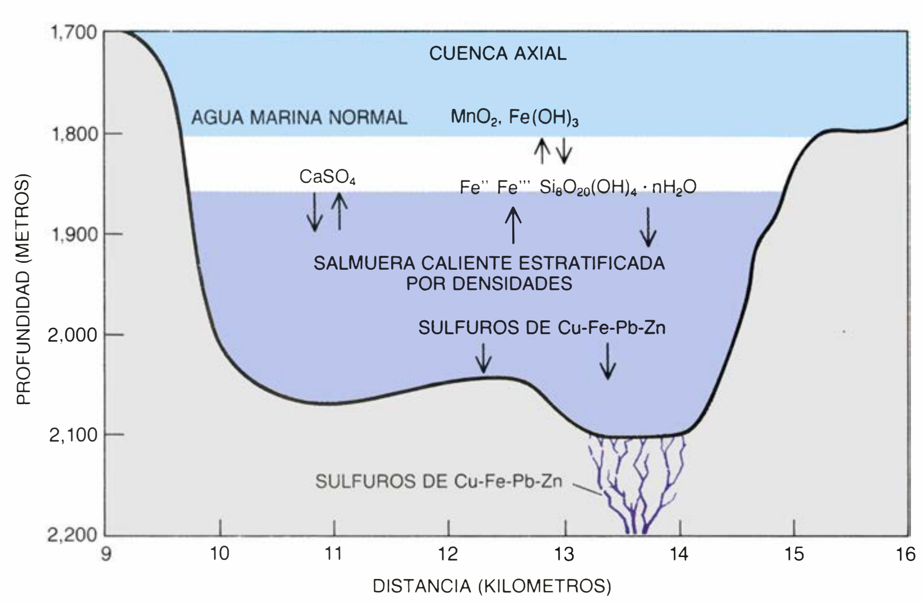
Este depósito es equiparable a los

mayores yacimientos antiguos emergidos de sulfuros. El Consorcio Saudí-Sudanés del mar Rojo, que representa a los estados ribereños adyacentes, financió un análisis de la capacidad de explotación minera del lugar en 1979. La comisión proyecta emprender una operación extractiva piloto a gran escala cuando mejore el mercado mundial de metales.

A medida que una cuenca oceánica se ensancha por expansión lenta, desde la etapa temprana representada en la actualidad por el mar Rojo hasta la etapa avanzada de apertura representada por el Atlántico, se suceden varios cambios. La circulación oceánica deja de estar restringida; hay más oxígeno, con lo que las condiciones reductoras se tornan oxidantes, y la salinidad de las soluciones hidrotermales disminuye generalmente a la del agua marina normal a medida que el fondo marino en expansión aleja las capas de sal de roca de la zona axial. Cualquier depósito de sulfuros que aflorase en el fondo del mar se descompondría por oxidación, a menos que lo protegiera una cubierta impermeable de sedimento o lava. Quizás haya depósitos como los de la hoya Atlantis II bajo ese tipo de capas en distintos puntos de los márgenes del Atlántico. Podría concentrarse una franja de depósitos en corteza oceánica a lo largo de las líneas de flujo de expansión del fondo del mar a partir de un sistema hidrotermal duradero, como el de la hoya Atlantis II.

El barco *Discover*, de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica

PROFUNDIDAD (KILOMETROS)
1
1.5
2
SAL
CUENCA AXIAL
SAL
BASALTO
CAMARA DE MAGMA
0 2 4 6 8 10 12 14 16 18 20 22
DISTANCIA (KILOMETROS)



5. EL MAR ROJO tipifica una clase de contexto donde tiene lugar el proceso de mineralización en fondo marino: una etapa temprana de la apertura de una cuenca oceánica, asociada a un centro de expansión lenta del fondo del mar. La corteza de la cuenca del mar Rojo contiene gruesas capas de sal de roca, formadas bajo condiciones anteriores. El agua marina que penetra por la corteza se saliniza enormemente; la sal aumenta la capacidad de la solución para transportar metales en forma de complejos con cloruro de la sal e incrementa la densidad de la solución. Se crea así una salmuera caliente, rica en metales y estratificada por densidades, que forma charcas en las cuencas axiales, como se muestra a la izquierda. Las reacciones representadas son la precipitación de metales en forma de partículas de sulfuros de cobre, hierro, plomo y cinc en condiciones reductoras (sin oxígeno libre) en las capas inferiores de las salmueras calientes y en forma de partículas de sulfatos en condiciones oxidantes donde las capas superiores de la salmuera se mezclan con agua marina. Las partículas se decantan al fondo generando depósitos estratificados de sedimento metalífero.

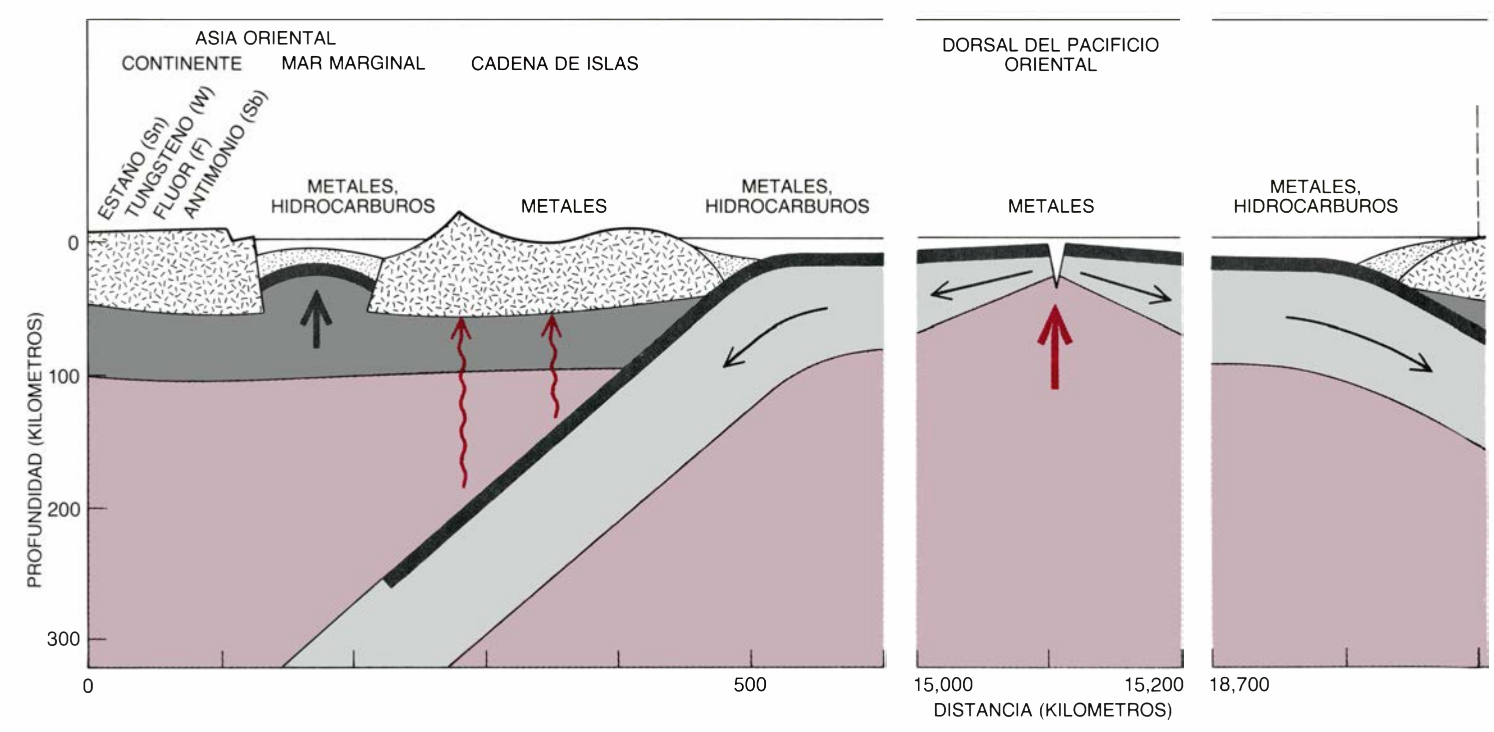
de los Estados Unidos, halló pruebas de la existencia de depósitos de ese tipo en 1972, mientras realizaba un crucero para cartografiar el fondo del mar a través de la dorsal mesoatlántica a la latitud de Miami. En la ladera oriental del valle axial de la dorsal mesoatlántica el barco extrajo inesperadamente una muestra negra, estratificada y desmenuzable, de roca. Se trataba de óxido de manganeso de notable pureza (50 por ciento de manganeso) que se había acumulado muy rápidamente, señal de que se originó por precipitación a partir de manantiales termales ricos en metales de baja temperatura (inferior a los 200 grados Celsius). El lugar se ha denominado campo hidrotermal TAG (por *T*rans-*A*tlantic *G*eotraverse project). Se sigue investigando en él, incluso mediante inmersiones con el sumergible *Alvin*.

Los depósitos estratificados de óxido de manganeso producidos por la emanación de manantiales termales a baja temperatura en el campo TAG se apoyan sobre rocas volcánicas de corteza oceánica. Las paredes de grandes zonas de fractura que desencajan segmentos de la dorsal mesoatlántica constituyen ventanas parciales más profundas a la corteza. En 1976, Enrico Bonatti, a la sazón en la Universidad de Miami, y sus colaboradores extrajeron rocas volcánicas de las paredes de las zonas de fractura del Atlántico ecuatorial que contenían una malla de vetas de sulfuros de cobre-hierro. Bonatti y sus colegas trazaron una analogía entre esas vetas y un tipo de sulfuro subyacente a muchas menas antiguas emergidas, llamadas sulfuros masivos.

La combinación de esos depósitos situados bajo el fondo del mar con los depósitos estratificados de óxido de manganeso que quedan encima podría resultar de un sistema de convección hidrotermal "agujereado". En tal sistema el agua marina normal se filtra y se mezcla con soluciones hidrotermales ascendentes, precipitando sulfuros de cobre y hierro si las condiciones en la corteza son reductoras, o depósitos estratificados de manganeso en condiciones oxidantes, allí donde las soluciones residuales desaguan en el fondo del mar.

La mineralización en el contexto de una etapa temprana de la apertura de una cuenca oceánica asociada a un centro de ritmo de expansión intermedio o rápido viene representada por algunos puntos de la zona axial del golfo de California; entre ellos, la cuenca de Guaymas. Contiene ésta varios centenares de metros de sedimento aportado por los ríos de los aledaños. El sedimento se entremezcla con minúsculos caparazones de carbonato cálcico y sílice de organismos que se decantan desde las aguas superficiales. Se supone la existencia de un sistema de convección hidrotermal metalogénico en el que se advierte un descenso de agua marina a través del sedimento y su interacción con rocas volcánicas calientes subyacentes a la cuenca para formar soluciones hidrotermales que disuelven metales de la roca y el sedimento. Al manar hacia arriba, las soluciones se alcalinizan por reacción con el sedimento rico en carbonato y precipitan depósitos de sulfuros metálicos (de cobre, hierro, plata y cinc) que se conservan en el fondo del mar. En él las soluciones depositan los metales restantes en varias fases minerales, en edificios de forma de pagoda que rematan pináculos de hasta 20 metros de altura. Tales pináculos los observó, en inmersiones a bordo del *Alvin*, Peter F. Lonsdale, de la Institución Oceanográfica Scripps, en 1977. Donde las soluciones calientes atraviesan sedimentos ricos en materia orgánica, la degradan a gas y petróleo, que impregnan el sedimento y ascienden desde el fondo marino en penachos de burbujas y gotitas.

Al sur del golfo de California, a 21 grados de latitud norte, en la dorsal del Pacífico oriental, hallamos un ejemplo de mineralización en una etapa avanzada de la apertura de una cuenca oceánica. En 1978, un equipo de investigadores franceses, estadounidenses y mexicanos, en un crucero geológico del lugar a bordo del sumergible francés *Cyana*, observaron y muestrearon curiosos pináculos de hasta 10 metros de



6. CONTEXTOS DE MANANTIALES TERMALES de fondo marino representados en un corte esquemático del océano Pacífico. Los contextos son un centro expansivo (aquí la dorsal del Pacífico oriental), un arco insular volcánico sobre una zona de subducción en un borde convergente de placa y un mar mar-

altura en un margen de la zona axial, en aguas de 2600 metros de profundidad. Meses después, técnicos del laboratorio del IFREMER (Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de la Mer) en Brest, determinaron que el material se componía de sulfuros de cobre, hierro y cinc; los curiosos pináculos constituían así los primeros cuerpos de sulfuros masivos hallados en el fondo marino. Los sulfuros masivos se cuentan entre los tipos de viejos yacimientos minerales de mayor importancia económica explotados en zona continental.

En 1979, un equipo de investigadores estadounidenses, franceses y mexicanos efectuaron inmersiones en el mismo lugar con el *Alvin*. Junto a los pináculos de sulfuros masivos realizaron un descubrimiento espectacular: de una suerte de chimeneas manaban, ondulantes, nubes negras y turbulentas de fluido. El fluido expulsado por esos humeros negros es una solución hidrotermal rica en metales, reductora, ácida, clara y muy caliente (350 grados Celsius). Su mezcla con el agua marina ambiental provoca la precipitación de sulfuros de cobre, hierro y cinc en forma de finas partículas negras suspendidas en los penachos que ascienden y tienden a flotar.

Los humeros negros persisten sólo unos años. Su corta vida se deduce de la datación radiométrica de materiales de la chimenea, del tiempo de residencia de las soluciones que circulan por convección, de la edad de los organismos asociados y de la tasa calculada de disipación de calor sobrante de la reposición de calor por expansión del fondo marino. Las chimeneas se alzan hasta 10 metros por encima de pináculos de una altura parecida, compuestos principalmente de restos de la desintegración de las chimeneas. En un corte horizontal de una chimenea probablemente aparezcan varios minerales en un radio de escasos centímetros.

ginal situado entre el arco de islas y una masa continental adyacente, que en este caso es Asia oriental.

Sulfuros de cobre y hierro precipitados desde las soluciones más calientes revisten el orificio; hacia fuera se encuentran sulfuros de hierro y cinc, interpenetrados por sulfato cálcico precipitado a partir de soluciones menos calientes que se han mezclado con agua marina. El tenor de los metales de la chimenea es comparable con el de muchos sulfuros masivos antiguos hoy emergidos. Un pináculo típico en este lugar del Pacífico contiene un 31 por ciento de cinc, 14 por ciento de hierro, 1 por ciento de cobre, 142 gramos de plata por tonelada métrica y cantidades traza de oro. Con todo, la cantidad de metal presente en un solo pináculo con chimenea (que puede alcanzar varios millares de toneladas métricas) es insuficiente para calificarla de susceptible de explotación comercialmente rentable.

Los sistemas de convección hidrotermal que producen los humeros negros son principalmente "herméticos". El agua marina penetra uno o dos kilómetros hasta una cámara magmática. El agua caldeada asciende, se convierte en solución hidrotermal por intercambio químico con las rocas volcánicas y desagua directamente desde el fondo marino sin mezcla previa significativa. En condiciones de circulación oceánica no restringida, en una dorsal como la del Pacífico oriental, esta convección es ineficaz como sistema metalogénico, porque casi todos los metales descargados en un humero negro suben literalmente con el humo y los dispersan las corrientes oceánicas. Sólo quedan depósitos pequeños en forma de montículos rematados por chimeneas.

En 1982, Lonsdale, Rodey Batiza, de la Universidad de Washington, y Thomas Simkin, de la Institución Smithsoniana, investigaron dos montes submarinos volcánicos cuya cima quedaba bajo 2000 metros de agua frente al eje expansivo de la dorsal del Pacífico oriental. Abordo del *Alvin*, se sumergieron hasta las calderas (depresiones circulares de varios kilómetros de diámetro formadas por hundimiento resultante de la pérdida de magma de una cámara subyacente) de la cima de los montes submarinos. En las calderas se distinguían varios depósitos hidrotermales. Descubrieron con sorpresa trémulos fluidos hidrotermales que, tras ser arrojados por las chimeneas, descendían por las laderas. Sin duda el fluido caliente era más denso que la fría agua marina ambiental. Lonsdale y sus colaboradores dedujeron de ello que las soluciones hidrotermales habían hervido, de resultas de lo cual se había separado un vapor de un líquido denso que había formado una charca en la caldera.

¿Cuáles son las aplicaciones posibles de cuanto hasta ahora se ha descubierto acerca de la mineralización del suelo marino? Tal vez sea aún remota la explotación minera del fondo, pero los descubrimientos de manantiales termales ricos en metales en centros expansivos del mar están aclarando los procesos que formaron muchos yacimientos minerales hidrotermales antiguos hoy emergidos. Ya en el siglo XIX algunos especialistas en geología aplicada supusieron que las "exhalaciones" volcánicas submarinas que conllevaban la expulsión localizada de fluidos debían haber desempeñado un papel importante en la formación de determinados yacimientos minerales. Los hallazgos recientes confirman esa idea. Además, los manantiales termales oceánicos brindan laboratorios naturales donde observar directamente los procesos metalogénicos.

Una interpretación restringida de esa aplicación es extender las observaciones a las ofiolitas: porciones de corteza oceánica y manto superior generadas en lo que un día fueron centros expansivos del fondo y posteriormente se levantaron hasta emerger. Los yacimientos hidrotermales en ofiolitas se interpretan como análogos directos de los depósitos formados en los contextos de suelo marino que he descrito. Un ejemplo clásico lo constituyen los yacimientos minerales del macizo de Troodos, una extensión de 2000 kilómetros cuadrados de antigua corteza oceánica que hoy aflora en la isla de Chipre. La palabra cobre es un derivado de Kypros, el antiguo nombre de la isla, y refleja la importancia de los yacimientos de Troodos como fuente de dicho metal desde los tiempos preclásicos hasta los modernos. Unos 90 yacimientos de sul-

furos masivos de cobre, hierro y cinc se presentan en cuerpos con forma de plato, cuyas dimensiones se extienden centenares de metros de diámetro y alcanzan pesos de hasta 15 millones de toneladas métricas. Rellenan depresiones en lavas volcánicas que surgieran de erupciones sobre el fondo del mar hace unos 85 millones de años.

El macizo de Troodos se integra en un cinturón de ofiolitas provisto de menas parecidas que se extiende por Turquía sudoriental, Irán meridional y Omán. Otras fajas ofiolíticas de edad variable que presentan mineralización hidrotermal se extienden por los siguientes lugares: el Tibet, a lo largo del margen septentrional del Himalaya; islas del Pacífico occidental, incluidas las Filipinas, Nueva Guinea y Nueva Caledonia; márgenes oriental y occidental de Norteamérica y el margen septentrional de Sudamérica; Apeninos italianos; Escandinavia occidental y Montes Urales, Unión Soviética.

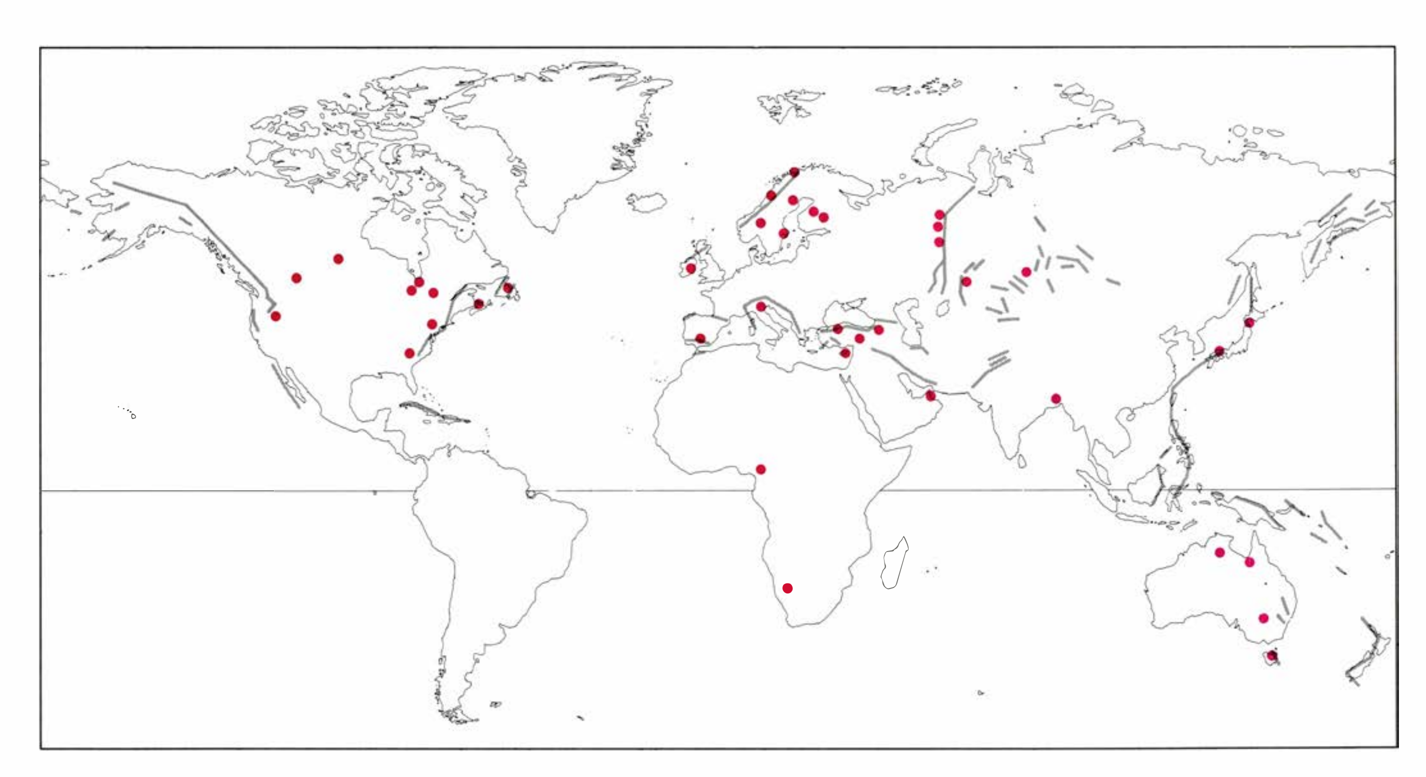
Una aplicación más amplia es considerar los manantiales termales de fondo marino laboratorios naturales que permiten estudiar procesos metalogénicos hidrotermales allí donde se encuentran los componentes de un sistema de convección. Ciertos experimentadores, que han provocado la reacción de roca con agua marina a altas presiones y temperaturas en contenedores cerrados, han observado que la reacción con tipos diversos de roca volcánica o ciertos sedimentos produce soluciones ricas en metales, reductoras y ácidas parecidas a las que descargan los manantiales termales del suelo marino. El hallazgo implica que los procesos metalogénicos hidrotermales de fondo marino trascienden cualquier contexto particular y operan en contextos tan dispares como los centros expansivos que he descrito, los arcos volcánicos y las zonas de fragmentación de continentes.

En los suelos contiguos a arcos volcánicos suprayacentes a zonas de subducción en bordes convergentes de placas a lo largo del Pacífico occidental se hallan los contextos menos explorados y más prometedores. Recordemos, entre ellos, los mares marginales situados entre arcos insulares volcánicos y una masa continental adyacente. Se dan junto al archipiélago del Japón, las Filipinas, Indonesia y Melanesia. En muchos de esos mares marginales hay centros de expansión del fondo del mar. La mayoría de los yacimientos de sulfuros masivos en ofiolitas de tipo chipriota se formaron en centros expansivos como éstos.

Otro contexto de arco insular volcánico que favorece los sistemas metalogénicos de convección hidrotermal es el arco insular propiamente dicho y la región comprendida entre él y una fosa oceánica profunda situada donde la corteza oceánica penetra en una zona de subducción. Los sulfuros masivos de cobre, hierro, plomo y cinc de Kuroko (que significa mena negra) hallados en la porción septentrional de la isla japonesa de Honshu, constituyen depósitos de ese tipo. Contienen restos de chimeneas de sulfuros como las observadas en la dorsal del Pacífico oriental; se considera que los formaron humeros negros que evacuaban en el fondo marino hace unos 13 millones de años. Hay depósitos parecidos de diferentes edades en las islas Fiji, en la mina Buchans de Terranova, en Avoca (Irlanda oriental), y en Captain's Flat y Woodlawn (Australia oriental).

A diferencia de los yacimentos de Kuroko, englobados en rocas volcánicas de un arco insular, los yacimientos de sulfuros masivos de cobre, hierro, plomo y cinc del sur de Honshu se encuentran en rocas sedimentarias interestratificadas con rocas volcánicas. Steven D. Scott, actualmente en la Universidad de Toronto, ha establecido una analogía entre el contexto en que nacieron hace unos 200 millones de años y los depósitos que se forman en los sedimentos de la cuenca de Guaymas y sobre ellos.

En la perspectiva general de la historia de la Tierra, diversos episodios de fragmentación local o planeta-



7. YACIMIENTOS MINERALES ANTIGUOS, formados por manantiales termales de fondo marino, hoy emergidos; dan cuenta de varias fuentes importantes de mineral (*círculos de color*). Se cuentan entre ellos los yacimientos en roca volcánica o en sedimento, generados en principio en un contexto de fondo marino. Las líneas grises corresponden a cinturones de ofiolitas: material que se originó en antiguos puntos de expansión del fondo del mar y se elevó luego.

ria de continentes crearon contextos favorables a sistemas de convección hidrotermal de fondo marino. El último episodio de fragmentación planetaria se registró hace unos 200 millones de años, cuando el supercontinente Pangea empezó a desgarrarse. Los valles de fractura (rifts) que se abrieron en esa época en el Atlántico y el Mediterráneo y los que, incipientes, no lograron abrirse, pasaron por etapas parecidas a los acontecimientos que hoy se suceden en el mar Rojo y el golfo de California. Entonces se formaron depósitos hidrotermales enterrados ahora bajo kilómetros de sedimentos. Cuando a la divergencia de las placas le siguió su convergencia y choque, algunos de los depósitos se alzaron y afloraron, como ocurre en Chipre.

Episodios y lugares parecidos pueden identificarse en asociación con el Proterozoico inferior. Frederick J. Sawkins, de la Universidad de Minnesota, ha interpretado que varios yacimientos sedimentarios formados hace entre 750 y 1500 millones de años, durante el Proterozoico, son el producto de manantiales termales ricos en metales que desaguaban en contextos como el de la cuenca de Guaymas. Entre esos yacimientos se cuentan las menas estratificadas de sulfuros de plomo y cinc de Sullivan, Columbia Británica sudoriental, los yacimientos estratificados de plata, plomo y cinc de Mount Isa, Australia, y los yacimientos de plomo y cinc del río McArthur, también en Australia. Kurt Bostrom, de la Universidad de Estocolmo, ha interpretado las menas de óxidos de hierro y manganeso proterozoicas de Suecia septentrional a través de un contexto de valle de fractura.

Remontándonos más aún en el tiempo geológico, prevalecieron condiciones favorables a sistemas de convección hidrotermal metalogénica de fondo marino, hace entre 2600 y 2700 millones de años, en rocas del período Arcaico que afloran en la porción oriental del escudo canadiense. Que se sepa, pertenecen a ese período más de 80 yacimientos de sulfuros masivos de cobre y cinc, incluidos el mayor conocido (las menas de más de 200 millones de toneladas métricas de Kidd Creek, en Timmons, Ontario) y otros yacimientos del rico distrito minero de Noranda, Quebec.

Las analogías establecidas entre esas menas antiguas y los procesos de mineralización que operan hoy en el mar revelan hasta qué punto ha cambiado la opinión general de los geólogos desde la aparición de la tectónica de placas, hace 15 años. Afirmábase entonces que la mineralización era improbable en un fondo marino dinámico. Los descubrimientos posteriores sobre mineralización en centros expansivos del suelo han demostrado lo contrario. Lo que le falta a la corteza oceánica en edad, diversidad de composición e historia de deformaciones complejas se compensa con la intensidad de procesos metalogénicos hidrotermales donde quiera que haya fuentes adecuadas de calor magmático: bordes de placa sumergidos y en zonas de vulcanismo submarino en el interior de una placa.

Se está avanzando en la comprensión de la relación que guardan los manantiales termales ricos en metales de diferentes contextos del fondo marino y los yacimientos minerales antiguos concentrados por esos manantiales. El proceso unificador contempla el intercambio de calor y masa entre la roca volcánica y el agua marina que circula en sistemas de convección hidrotermal del fondo. El proceso va asociado a fragmentación cortical y actividad volcánica en diferentes contextos de centros expansivos del suelo marino, arcos insulares volcánicos y continentes.

Las variaciones del proceso fundamental se traducen en diferentes clases de yacimientos, e incluso pueden converger, creando depósitos parecidos. Por ejemplo, el desarrollo de un exceso de salinidad, bien sea por la disolución de capas de sal locales, como en la hoya Atlantis II, o por ebullición, como en las calderas de montes submarinos, genera similares yacimientos de sulfuros masivos estratificados con forma de plato. En cambio, los humeros negros que arrojan material flotante desde el fondo del mar pueden concentrar depósitos en forma de pináculo. Las variaciones del contenido en metales de los yacimientos se relacionan con el contenido metálico de las rocas fuente; por ejemplo, la circulación hidrotermal extrae más plomo de rocas continentales que de rocas oceánicas. La interacción entre la investigación de depósitos minerales en manantiales termales de fondo marino y el estudio de sus análogos antiguos aumenta la capacidad humana de hallar grandes yacimientos minerales hidrotermales en el continente, a la vez que enriquece nuestro conocimiento del efecto de los intercambios químicos y térmicos entre el agua marina y la corteza oceánica del suelo.

Defensa química de las plantas superiores

Ciertos compuestos producidos por las plantas son tóxicos para los herbívoros; otros menguan el valor nutritivo de las mismas o impiden el crecimiento de un insecto. Los herbívoros, por su parte, han desarrollado técnicas de contraataque

Gerald A. Rosenthal

Siquiera una consideración fortuita de la relación entre las plantas superiores y la multitud de animales que las consumen provoca que el observador se maraville ante la capacidad de las plantas para sobrevivir. Cuando es atacada por un depredador, un insecto, por ejemplo, la planta no puede huir, ni defenderse físicamente. Sin embargo, muchas han desarrollado sutiles mecanismos para protegerse, no menos eficaces. Tales defensas pueden ser simples o elaboradas. Ciertas plantas fabrican toxinas que envenenan al herbívoro atacante, en tanto que otras producen compuestos complejos que perturban el ciclo de crecimiento del agresor o su capacidad para digerir la planta.

Los insectos y otros herbívoros, por su parte, han desarrollado respuestas a esta guerra química. Muchos han logrado adaptarse a los mecanismos defensivos de las plantas, generando respuestas químicas propias. Algunos insectos han inventando métodos para convertir substancias potencialmente perjudiciales, producidas por las plantas, en fuentes nutritivas o de protección contra insectívoros. El estudio de estas interacciones químicas entre organismos constituye la base de una floreciente disciplina llamada ecología química.

El ecólogo químico estudia la función de los compuestos químicos naturales en las relaciones entre organismos. Una de estas relaciones es la alimentación: todos los insectos que comen plantas tienen, en lo fundamental, las mismas necesidades nutritivas que pueden ser satisfechas, en mayor o menor grado, por la inmensa mayoría de las plantas superiores. Entonces, ¿qué es lo que define la pauta específica de alimentación de un insecto? ¿En virtud de qué elige o rechaza el recurso alimentario de una planta determinada? Según apuntaba Gottfried S. Fraenkel, no son los metabolitos primarios de una planta (las substancias que sintetiza y resultan esenciales para su crecimiento y reproducción) lo que la convierten en adecuada o inadecuada como recurso alimentario. Al contrario, la conveniencia de la planta depende en gran medida de sus metabolitos secundarios: compuestos metabólicos no implicados en los procesos ordinarios de la vida, que varían de una mata a otra, contribuyendo a definir las características singulares de cada individuo.

En 1971, Robert H. Whittaker y Paul P. Feeny, de la Universidad de Cornell, sumaron una nueva precisión al concepto de Fraenkel. Propusieron que los metabolitos secundarios producidos por un individuo de una especie y capaces de influir en el crecimiento, la salud, la biología de la población o el comportamiento de otra especie, fueran llamados aleloquímicos (los ecólogos químicos emplean hoy día los términos aleloquímico [*allelochemic*] y compuesto aleloquímico [*allelochemical*] indistintamente; en cuanto a mí, prefiero este último). Entre los muchos tipos de compuestos aleloquímicos están los atrayentes, los repelentes, los alérgenos y las toxinas. En este artículo me ocuparé de los compuestos aleloquímicos empleados por ciertas plantas para defenderse de la depredación por insectos y otros herbívoros.

La forma usual de definir la capacidad defensiva de los compuestos aleloquímicos de una planta superior consiste en demostrar su toxicidad frente a uno o varios insectos que han dado en ser aceptados como especies patrón de referencia para la evaluación de la toxicidad biológica. El planteamiento de costumbre pasa por incorporar los compuestos aleloquímicos naturales en una dieta artificial que, normalmente, sustentaría al insecto. J. M. Erickson, a la sazón alumno de Feeny, y éste mismo, en su trabajo sobre un papiliónido, *Papilio polyxenes*, modificaron dicho método en aras de un enfoque más natural. En vez de crear una dieta artificial para sus insectos, introducían el compuesto aleloquímico vegetal en una planta que forma parte de la dieta natural de las mariposas.

Las *P. polyxenes* adultas evitan las plantas de la familia de las crucíferas (las mostazas) que producen compuestos aleloquímicos como el sinigrín, que contiene un componente tóxico: alilisotiocianato. Por otro lado, las mariposas forrajean ávidamente entre las umbelíferas, que incluyen plantas como el apio. Erickson y Feeny criaron larvas de *P. polyxenes* con una dieta de hojas de apio inducidas a absorber sinigrín. Las larvas comían y su crecimiento se vio fuertemente inhibido. El apio con una concentración de sinigrín equivalente a la encontrada en crucíferas resultó letal para todas las larvas sometidas a ensayo. Esos experimentos demostraron que los compuestos aleloquímicos tóxicos podían hacer inaceptable, para una plaga de insectos, una planta huésped por lo demás perfectamente adecuada.

David A. Jones y sus colegas, de la Universidad de Hull, idearon otra verificación experimental de la eficacia de los compuestos aleloquímicos tóxicos. Estudiaron el trébol blanco y el cuernecillo, especies capaces de producir glicósidos cianogénicos: compuestos formados por azúcares unidos a complejos de cianuro. Si hay cierto par de enzimas cuando las hojas de la planta sufren algún daño, los glicósidos en cuestión se descomponen para liberar

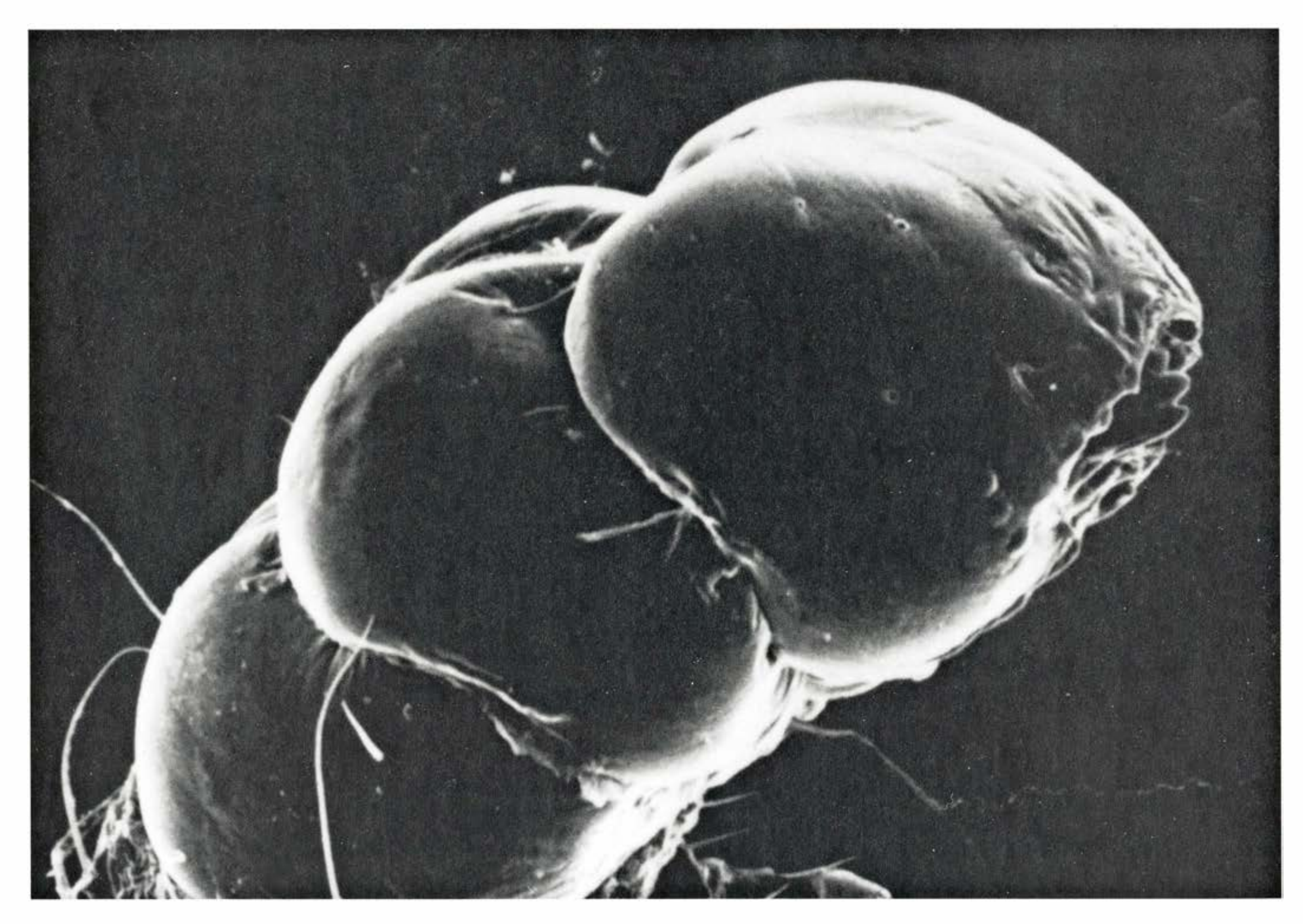
el complejo de cianuro, del que finalmente se desprende el cianuro. El cuernecillo y el trébol blanco son "polimórficos" para la cianogénesis: sólo determinados individuos vegetales pueden sintetizar a un tiempo los glicósidos cianogénicos y las enzimas necesarias para liberar el cianuro. Así pues, no todas las plantas de una y otra especie pueden defenderse mediante dichos compuestos.

Jones aprovechó esta peculiar propiedad para determinar cuán eficaz resultaba la estrategia de la cianogénesis para la población en el área de estudio. Examinó un mapa, publicado por Hunor Daday, a la sazón en la Estación Welsh de Mejora Vegetal de Aberystwyth, en 1954, que presentaba la distribución geográfica de las plantas capaces de sintetizar los glicósidos cianogénicos y las oportunas enzimas; potenciales productoras, por tanto, de cianuro. Daday había descubierto una sorprendente relación entre la temperatura media de enero en las regiones cubiertas por su investigación y la proporción de tréboles que podían producir cianuro libre. En las regiones más templadas, como las que circundan el mar Mediterráneo, del 70 al 90 por ciento de las plantas recogidas presentaban cianogénesis, mientras que en las más frías, como ciertas zonas de la URSS, ninguna de las plantas analizadas era cianogénica.

Jones y sus colegas observaron que las babosas y los caracoles, dos importantes depredadores del cuernecillo, tienden a consumir plantas acianogénicas con preferencia a cianogénicas. Así pues, la capacidad de producir cianuro libre sería más ventajosa para las plantas de hábitats más templados, donde las babosas y los caracoles permanecen activos durante el invierno. La cianogénesis sería menos valiosa para las plantas de áreas donde las condiciones meteorológicas invernales controlan las poblaciones herbívoras.

Otro tipo de defensa que emplea compuestos aleloquímicos tóxicos es el descrito por Eloy Rodríguez, de la Universidad de California en Irvine. En un notable estudio de la vegetación de Baja California y Chihuahua, ha descubierto que los tricomas, o pelos, de muchas plantas de desierto son depósitos de productos naturales tóxicos. Los tricomas de *Phacelia*, por ejemplo, contienen numerosos venenos: insecticidas y substancias alergénicas. Los tricomas de otra planta del desierto, *Parthenium hysterophorus*, una compuesta, contienen ciertas substancias alergénicas que disuaden a los herbívoros de comerla.

Algunos compuestos aleloquímicos protegen a las plantas que los producen, no envenenando o repeliendo a los herbívoros, sino trastocando los ciclos normales de crecimiento y desarrollo de los depredadores. Muchos insectos conocen tres estadios morfológicamente distintos: larva, pupa y adulto. Algunos pasan por varios estadios lar-



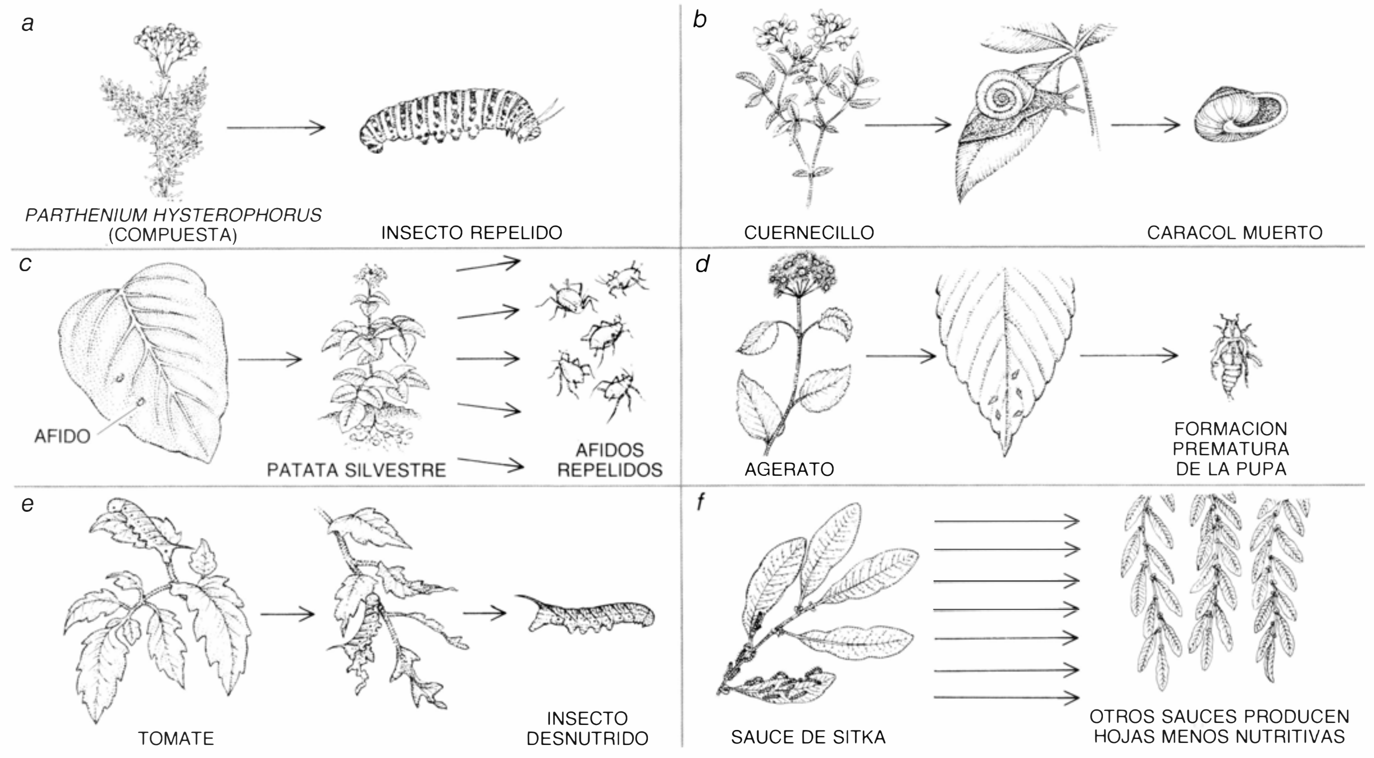
1. SE DESARROLLA UNA PUPA ANORMAL con tres cabezas cuando la larva de *Laphygma fongiperda* come un extracto de *Ajuga remota*, una labiada. La planta produce fitoecdisonas: compuestos que imitan las hormonas de crecimiento normales, los ecdisteroides, de la larva. Las fitoecdisonas determinan que el insecto experimente varias veces los procesos celulares que, por lo común, preceden a la metamorfosis, sin desprenderse de hecho del exoesqueleto larvario y desarrollando en cada ocasión una nueva cápsula cefálica. Las cápsulas cefálicas supernumerarias impiden el funcionamiento de las piezas bucales, y la larva muere de hambre. La imitación de las hormonas naturales de un depredador constituye una de las formas más elaboradas de defensa química practicada por las plantas. Otros métodos son el envenenamiento del herbívoro o la producción de substancias que pueden disuadirlo de comer o de poner huevos.

varios antes de llegar a pupa. Otros no atraviesan estadios morfológicamente distintos; los jóvenes, que se asemejan a los adultos en el aspecto, pasan por diversos períodos de ecdisis, o muda, aumentando de tamaño en cada estadio. Dos clases de hormona que intervienen en el desarrollo de los insectos son las hormonas juveniles producidas por las larvas y un grupo de hormonas conocidas colectivamente como ecdisteroides, que actúan iniciando los ciclos de ecdisis propios de la secuencia del desarrollo.

Adolf F. J. Butenandt, del Instituto Max Planck de Bioquímica en Munich, y Peter Karlson, por entonces en la Universidad de Tubinga, fueron los primeros en aislar los ecdisteroides. A partir de casi 1000 quilogramos de "gusanos de seda" aislaron finalmente 25 miligramos de un ecdisteroide llamado ecdisona, y alrededor de un tercio de miligramo de otro llamado 20-hidroxiecdisona. Poco después, Koji Nakanishi, ahora en la Universidad de Columbia, y T. Takemoto, de la Universidad de Tokushima, descubrían que ciertas plantas eran magníficas fuentes de substancias ecdisónicas. Lograron extraer 25 miligramos de 20-hidroxiecdisona a partir de 2,5 gramos de un rizoma seco (órgano subterráneo de almacenamiento alimentario) del helecho *Polypodium vulgare*. Eso animó la búsqueda, por parte de otros muchos investigadores, de nuevas fitoecdisonas (ecdisteroides producidos por las plantas). A la postre, se aislaron varias docenas de compuestos estructuralmente distintos, algunos de los cuales resultaron ser aún más potentes que otros similares que se dan, de forma natural, en los insectos.

Trabajando en Kenia, Isao Kubo y sus colegas, de la Universidad de California en Berkeley, confirmaron hace poco que las fitoecdisonas actuaban como poderosos agentes protectores al perturbar los ciclos de crecimiento de los insectos que depredan plantas productoras de las mismas. Estos investigadores descubrieron que, después de que los enjambres de langosta hubieran devastado amplias extensiones de sabana, la única planta sobreviviente era una labiada, *Ajuga remota*. Cuando alimentaron insectos con extractos de *A. remota*, el resultado fue una extraordinaria aberración del desarrollo: en la metamorfosis de larva a pupa, el insecto no producía una sino varias cápsulas cefálicas. Dichas cápsulas supernumerarias obliteraban las piezas bucales, y el insecto moría de hambre. Kubo demostró que esta anormalidad del desarrollo debíase a la presencia, en la planta, de varios fitoecdisteroides que bloqueaban el tránsito normal de larva a pupa. Se daban los procesos celulares que normalmente inician la metamorfosis, pero quedaba abortado el desprendimiento del exosqueleto larvario.

Así como *A. remota* se protege mediante la producción de compuestos análogos a los ecdisteroides, ciertas plantas emplean símiles de las hormonas juveniles. En muchos insectos, la hormona juvenil actúa como un elemento de control del proceso de desarrollo. Mientras la larva la produce, los ecdisteroides sólo pueden iniciar la



2. POR SU MODO DE ACCION, los métodos de defensa química de las plantas superiores van desde los muy sencillos hasta los sumamente elaborados. Algunas plantas, como la compuesta *Parthenium hysterophorus* (*a*), fabrican productos químicos repelentes que disuaden a los depredadores de comerlas o de poner huevos en ellas. Otras, como el cuernecillo (*b*), sintetizan toxinas letales; ciertos cuernecillos producen glicósidos cianogénicos (compuestos formados por azúcares unidos a complejos de cianuro) y enzimas que liberan el cianuro de dichos glicósidos. Las estrategias defensivas más complicadas pasan por la producción de substancias naturales que imitan las sintetizadas normalmente por un herbívoro, como *Ajuga remota*, que remeda las hormonas de crecimiento naturales (*véase la figura 1*). Otra de tales plantas es la patata silvestre *Solanum berthaulthii* (*c*), que sintetiza un ingrediente de la feromona de alarma de los áfidos (substancia que un áfido puede liberar al verse atacado, para advertir a otros de la presencia de un insectívoro). Los áfidos huyen de una planta productora de feromona como lo harían de un depredador. Otras plantas se defienden inhibiendo la acción de los compuestos bioquímicos de un insecto. Por ejemplo, el agerato, *Ageratum houstonianum* (*d*), sintetiza una substancia que inhibe la hormona juvenil de los insectos, matando las larvas al obligarlas a mudar prematuramente. Muchas plantas no mantienen reservas permanentes de compuestos químicos defensivos, sino que los sintetizan sólo en respuesta a la depredación. Cuando el tomate (*e*), por ejemplo, sufre el ataque de un insecto masticador, recibe estímulos para sintetizar inhibidores de proteinasas, macromoléculas que inhiben la digestión de muchas proteínas de la planta en el insecto. También puede darse un tipo más exótico de defensa inducida. Cuando un "sauce de Sitka" (*f*) se ve atacado por ciertas orugas, la calidad nutritiva de las hojas de los sauces vecinos –incluso las de aquellos que no han sido atacados– se deteriora. Quizás el árbol emite una substancia que actúa como una feromona, advirtiendo a otros individuos de la especie para que se preparen ante el ataque de un herbívoro.

muda de un estadio larvario a otro; el insecto no se puede metamorfosear en pupa a menos que dicha hormona se degrade y, por ello, sea incapaz de mediar en la formación de la pupa dirigida por los ecdisteroides. Los juvenoides, substancias que se parecen a las hormonas juveniles, pero producidas por las plantas, pueden ser un importante factor de protección para la planta si son letales. (De lo contrario, sólo alcanzan a prolongar el estadio larvario, que es, irónicamente, la fase más destructiva de la vida de un insecto.)

Los primeros juvenoides fueron descubiertos en 1964, cuando Karel Sláma vino del Instituto Entomológico de la Academia de Ciencias Checoslovaca a trabajar con Carroll M. Williams, de la Universidad de Harvard. Ambos investigadores planearon estudios conjuntos sobre *Pyrrhocoris apterus*, una chinche de Europa. *P. apterus* pasa, por lo común, por cinco estadios distintos antes de metamorfosearse en adulto. Sláma y Williams se hallaron con el sorprendente descubrimiento de que los insectos criados en Harvard no realizaban la ecdisis del quinto estadio a adulto: antes bien, pasaban por un sexto y, a veces, incluso por un séptimo estadio. Sláma nunca había observado semejante pauta de desarrollo en Checoslovaquia.

A la larga, tornóse evidente que los insectos debían haber estado expuestos a una hormona juvenil que interfería el desarrollo normal. Una serie de ensayos puso de manifiesto que el factor crítico tenía que ser el papel colocado en las placas de petri que albergaban las chinches. Los investigadores realizaron pruebas con diversos papeles y encontraron que muchos diarios y revistas norteamericanos desencadenaban la misma anomalía, mientras que similares productos de origen europeo y japonés no lo hacían. (En Checoslovaquia, por supuesto, Sláma forraba las placas con papel de filtro europeo.) Sláma y Williams consiguieron aislar el factor activo de las toallas de papel y demostrar que sólo era eficaz contra la familia Pyrrhocoridae. Una familia próxima, Lygaeidae, era totalmente indiferente al factor.

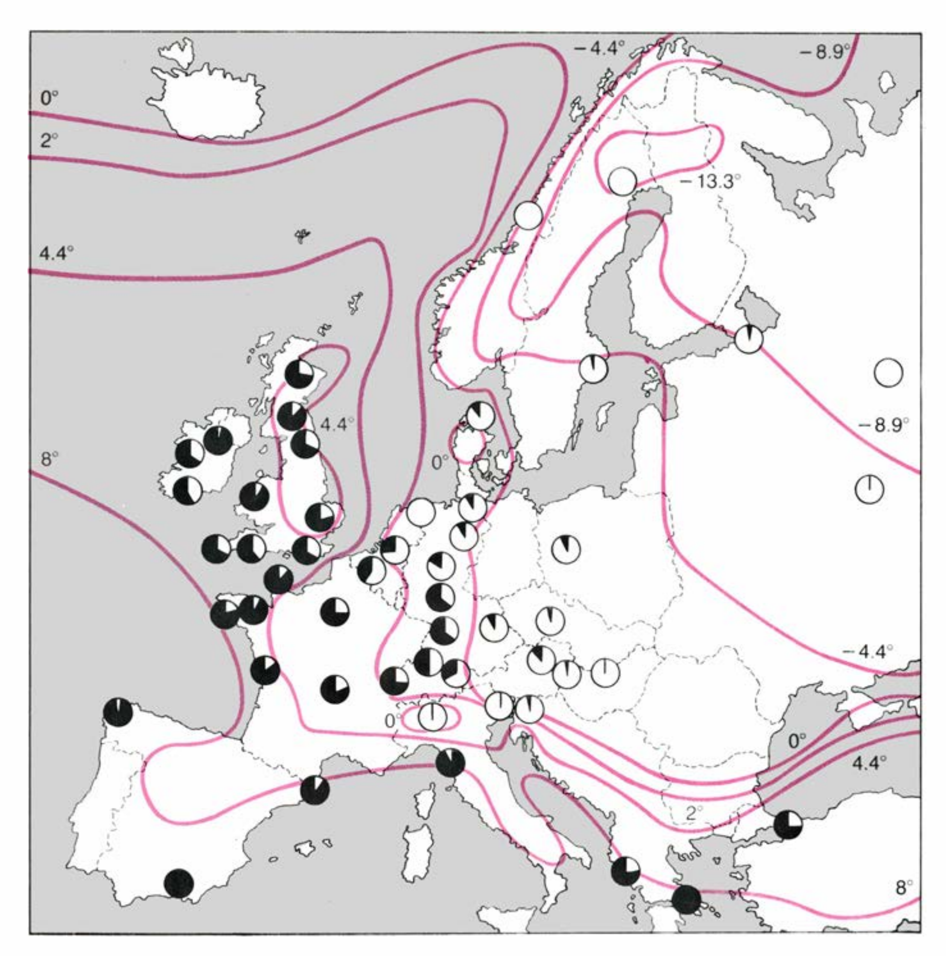
Por último, siguieron la pista del factor activo hasta la pulpa de madera con la que se había fabricado el papel. La pulpa de un abeto, *Abies balsamea*, que es una de las principales fuentes de pulpa para los productos de papel norteamericano, resultó particularmente activa. Varios años más tarde, William S. Bowers, por entonces en la Estación Agraria Experimental del estado de Nueva York, aislaba y caracterizaba el factor en cuestión, al que llamó juvabiona. Es muy similar en estructura a las hormonas juveniles de los insectos.

Unos años después, Bowers decidió investigar si otras plantas se protegían mediante bloqueo, que no por imitación, de la hormona juvenil normal de un insecto. Un antagonista de la hormona juvenil podría matar a un insecto, haciéndole mudar prematuramente al estadio adulto. Con el tiempo, consiguió aislar dos substancias de esta índole en el agerato, *Ageratum houstonianum*, una plantita que vive en regiones templadas. Las llamó prococeno I y prococeno II, por su capacidad de activar una metamorfosis precoz al impedir la secreción de hormona juvenil. El prococeno II tiene, además, otros efectos: determina la producción de atrayentes sexuales en la cucaracha americana, hace que varios tipos de insecto depositen huevos estériles y obliga al escarabajo de la patata de Colorado a entrar en ese estadio de hibernación que llamamos diapausa. Cuando insectos que han sido alimentados con prococeno II reciben un tratamiento posterior de hormona juvenil, los efectos deletéreos del prococeno remiten.

Las plantas pueden imitar otras muchas substancias secretadas de forma natural por los insectos. Por ejemplo, el áfido *Myzus persicae*, que depreda plantas como la patata silvestre, segrega feromona de alarma cuando se ve atacado por un depredador. La feromona, volátil, alerta a otros áfidos del inminente peligro. Un ingrediente importante de la feromona de alarma es un compuesto llamado (E)-beta-farneseno. Richard Gibson y John A. Pickett, de la Estación Experimental Rothamstead, Inglaterra, han descubierto que *Solanum berthaulthii*, una patata silvestre, emite (*E*)-beta-farneseno por los tricomas de las hojas. De este modo, la planta puede repeler una gran plaga,imitando la señal de alarma de ésta. El insecto no puede contrarrestar o adaptarse fácilmente a este tipo de defensa, pues no le cabe ignorar que esa misma señal química es fundamental para su supervivencia.

Empero, ciertos insectos han logrado adaptarse a las defensas químicas de las plantas. En muchos casos, la adaptación ha seguido un camino sorprendente: en ocasiones, el insecto puede almacenar y hacer buen uso del compuesto químico que la planta emplea como defensa.

Un ejemplo de ello es el saltamontes *Poekilocerus bufonius*, que se alimenta



3. CAPACIDAD DE PRODUCIR CIANURO LIBRE: varía de unos cuernecillos a otros. Un elevado porcentaje de las plantas de las regiones más templadas sintetizan glicósidos cianogénicos y las enzimas necesarias para liberar cianuro de ellos. (El porcentaje de plantas cianogénicas está representado por el sector negro del círculo.) En las zonas con inviernos más fríos (las isotermas corresponden a la temperatura media de enero en grados centígrados), hay menos plantas cianogénicas. Las plantas de las regiones frías, donde el clima es un control eficaz del depredador, no tienen tanta necesidad de defenderse químicamente.

exclusivamente de plantas de la familia Asclepiadaceae: las asclepias, por ejemplo. Las asclepias sintetizan diversos compuestos complejos conocidos como cardenólidos: substancias tóxicas que pueden perturbar la función cardíaca normal.

Cuando este saltamontes se ve atacado por un potencial depredador, puede defenderse mediante nebulización del contenido de una glándula venenosa. El análisis de este fluido revela que contiene dos importantes cardenólidos, la calactina y la calotropina, que también pueden ser extraídos de las asclepias que sirven de alimento al insecto. Cuando se mantiene un saltamontes con una dieta desprovista de tales plantas, la concentración de cardenólido en su nebulizador protector se reduce a una décima parte. Parece claro que es la propia planta el origen de los compuestos defensivos del fluido protector del insecto.

La existencia de insectos como este saltamontes, capaces de almacenar y utilizar los compuestos químicos defensivos de una planta, llevó a Whittaker y Feeny a redefinir el concepto de compuesto aleloquímico mediante división en varios grupos. Dos revisten particular importancia: las alomonas, que confieren una ventaja adaptativa al organismo que las produce, y las kairomonas, que la confieren al organismo que las recibe o consume. En el caso del saltamontes y las asclepias, un compuesto que originariamente pudo ser una alomona (el cardenólido), se ha convertido en una kairomona funcional que beneficia al insecto consumidor de la planta.

La adaptación del saltamontes a la defensa química de las asclepias es quizás un ejemplo de coevolución. La coevolución es un proceso recíproco en el que las propiedades y características de un organismo evolucionan en respuesta a las propiedades específicas de otro: cada una de las especies en interacción ejerce una presión selectiva que influye en el genoma de la otra. Algunas relaciones coevolutivas entre plantas e insectos han adquirido una especialización extraordinaria. Por ejemplo, ciertas flores sólo pueden ser polinizadas por una única especie de insecto; los insectos, a su vez, muestran una fidelidad absoluta a las flores de su planta huésped.

Existe un interés considerable por saber en qué medida las plantas superiores y sus plagas y depredadores de la clase de los insectos pueden haber evolucionado conjuntamente en el transcurso del tiempo. En el caso de los compuestos químicos defensivos, quizá las plantas superiores desarrollaron productos tóxicos naturales como parte de su barrera defensiva contra los herbívoros. Entre éstos, puede que unos hayan evitado simplemente las plantas, mientras que otros a lo mejor han desarrollado cierta capacidad para eliminar la toxicidad del sistema químico defensivo de aquéllas. Quizá las plantas se contraadaptaron, intensificando la efectividad de sus compuestos aleloquímicos y quizá ciertos insectos evolucionaron hasta el punto en que las alomonas de las plantas devinieron en kairomonas.

Otro ejemplo de insecto que explota un compuesto químico defensivo vegetal del estilo de la kairomona es la mariposa monarca. En 1967, Lincoln Pierson Brower, hoy en la Universidad de Florida, observó que las monarcas que se desarrollaban a partir de larvas que se habían alimentado en *Asclepias curassavica*, especie que almacena muchos cardenólidos, eran rechazadas por el córvido *Cyanocitta cristata*. Los córvidos que consumían mariposas, o siquiera partes de una mariposa, enfermaban gravemente. El descubrimiento de Brower era coherente con las observaciones realizadas por otros investigadores en el sentido de que las mariposas de la familia Danainae, que incluye la monarca, son rechazadas por un gran número de aves insectívoras. Brower analizó los compuestos de las monarcas adultas y en estadio de pupa, y encontró unos diez cardenólidos distintos; la cantidad total de toxina en el cuerpo de una mariposa es varias veces superior a la necesaria para matar un gato o un perro pequeño. Raro es el insecto que acumula todos los cardenólidos de la planta huésped, pero todos los que el insecto almacena tienen una contrapartida en la planta. Las mariposas criadas con una dieta exenta de cardenólidos no ejercen efecto dañino sobre *C. cristata*.

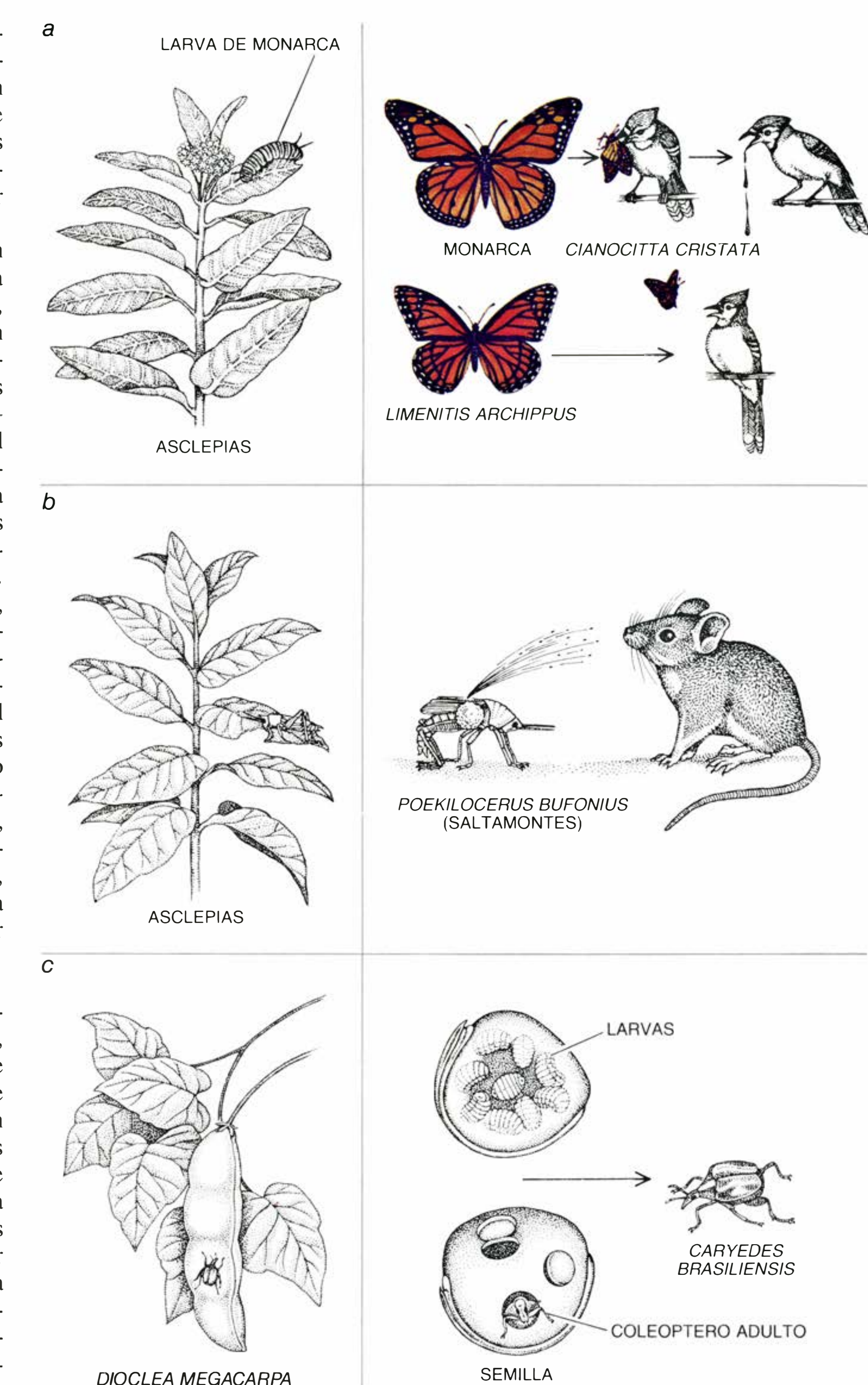
La monarca es aposemática: "advierte" de su toxicidad intrínseca mediante la llamativa coloración y las marcas distintivas de las alas. La presencia de insectos aposemáticos ha

dado lugar a una serie de mimetas. Estos insectos miméticos, como la mariposa *Limenitis archippus*, no acumulan cardenólidos, pero se parecen a los que sí lo hacen. Así, están bajo el paraguas protector de los cardenólidos sin necesidad de producir, regular, acumular o utilizar compuestos tóxicos.

El trabajo de campo de Brower en México central, territorio de invernada de un número inmenso de monarcas, ha añadido otra interesante dimensión a nuestro conocimiento de estas interacciones. En este hábitat, los ataques por *Icterus abeillei* y *Pheuctius melanocephalus papago* justificaban más del 60 por ciento de la mortalidad de la mariposa. La observación detallada de la alimentación de estos dos insectívoros reveló que las dos especies se comportan de formas absolutamente distintas. *I. abeillei*, sensible a los cardenólidos, elige ciertas partes de la mariposa: extrae selectivamente los músculos torácicos y el contenido abdominal sin tocar la cutícula (la cubierta exterior del cuerpo) cargada de cardenólidos, ni las alas. *Ph. melanocephalus*, por otro lado, es mucho menos sensible a las toxinas y come sin tantos miramientos, engullendo vorazmente el abdomen intacto. Ninguna defensa es inviolable y, al igual que las asclepias, la mariposa monarca no está protegida del todo por sus defensas químicas.

Uno de los ejemplos más asombrosos de adaptación de un insecto, hasta el punto en que una alomona se convierte en kairomona, nos lo ofrece el estudio de *Caryedes brasiliensis*, un coleóptero de la familia Bruchidae. Es el único depredador de las semillas de *Dioclea megacarpa*, una leguminosa que crece en los bosques caducifolios de Costa Rica. Alrededor del 13 por ciento de la materia seca de la semilla de *Dioclea* es L-canavanina, un aminoácido que normalmente no se incorpora en las proteínas y que puede actuar como un potente insecticida.

Daniel H. Janzen, de la Universidad de Pennsylvania, y el autor han descubierto varias adaptaciones bioquímicas singulares del coleóptero, que le permiten aprovechar la semilla, potencialmente tóxica, durante toda su vida larvaria. El insecto ha desarrollado las enzimas necesarias para convertir la canavanina en urea, y ésta en amonio. Y emplea el nitrógeno del amonio, que en un principio formaba parte de la molécula de canavanina, para sustentar la producción de la inmensa mayoría de aminoácidos que sintetiza. Así pues, una alomona de la planta, con un



4. RESPUESTAS DE LOS INSECTOS a las defensas químicas de las plantas. Entre éstas, concurren a menudo la explotación, con algún fin útil, de los mismos compuestos químicos destinados a alejarlos o matarlos. Las larvas de la mariposa monarca (*a*) se alimentan de las asclepias, *Asclepias curassavica*, especie que sintetiza toxinas: los cardenólidos. Las mariposas acumulan cardenólidos y son, por consiguiente, inaceptables como presa para el córvido *Cianocitta cristata*; los córvidos que las ingieren caen gravemente enfermos y, a la larga, rechazarán las monarcas como alimento. *Limenitis archippus* imita la apariencia de la monarca y, por ello, aunque no acumula toxinas, también es evitada por *C. cristata*. El saltamontes *Poekilocerus bufonius* (*b*) incorpora los cardenólidos que ingiere, cuando come asclepias, en un nebulizador venenoso que utiliza para protegerse de los depredadores. Las larvas del coleóptero *Caryedes brasiliensis* (*c*), un brúchido, se alimentan de semillas de la leguminosa *Dioclea megacarpa*. Las semillas contienen grandes cantidades de L-canavanina, un aminoácido que no se incorpora en las proteínas y que, con frecuencia, es un potente insecticida. Las larvas del coleóptero, que viven en el interior de la semilla y no comen otra cosa durante toda su existencia larvaria, pueden obtener amonio de la canavanina. Luego incorporan el nitrógeno del amonio (nitrógeno que originariamente formó parte de la molécula de canavanina) en los aminoácidos.

fuerte potencial tóxico, ha sido manipulada para que actúe como kairomona, proveyendo la totalidad del nitrógeno dietético que necesita la larva en desarrollo.

Hay todavía otra forma de explotación de las defensas químicas de una planta por parte de los insectos. Vincent G. Dethier, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, y Louis Schoonhoven, de la Universidad holandesa de Wageningen, junto con otros investigadores han descubierto que muchos insectos están equipados con receptores de sabor sensibles a los compuestos aleloquímicos de las plantas que constituyen su alimento. Por ejemplo, las larvas que consumen plantas de la familia Rosaceae tienen receptores para el sorbitol, un alcohol almacenado por dichas plantas. Otros insectos carecen normalmente de este tipo de receptores. Los así equipados pueden contar con su capacidad olfativa para localizar e identificar plantas portadoras de defensa química, a las que son inmunes o resistentes.

Hasta aquí me he ocupado fundamentalmente de los compuestos aleloquímicos constitutivos de una planta, es decir, producidos por ella, esté atacada o no por un depredador. Sin embargo, muchas plantas confían en lo que podríamos llamar defensas inducidas: compuestos protectores sintetizados sólo en respuesta a un ataque. Un excelente ejemplo nos lo ofrece el trabajo de Clarence A. Ryan y sus colegas en la Universidad del estado de Washington. Han descubierto que cuando ciertas plantas, como el tomate, son atacadas por insectos masticadores liberan una substancia que viaja por la planta desde el lugar de la herida, y desencadena la producción de al menos dos clases de macromoléculas conocidas como inhibidores de proteinasas. Los inhibidores de proteinasas zanjan la capacidad del insecto para romper las proteínas que ha ingerido con la hoja. De este modo, la hoja se hace menos aceptable como fuente de alimento.

La investigación de la defensa inducida ha dado, recientemente, un paso de gigante con el trabajo de David F. Rhoades, de la Universidad de Washington, así como con el de Jack C. Schultz y Ian Balwin, a la sazón en Dartmouth College. Se ha demostrado que cuando el sauce de Sitka, *Salix sitchensis*, es atacado por insectos, la calidad de la hoja (una medida de su idoneidad como recurso alimenticio para los insectos) se deteriora. Empero, Rhoades observó que la calidad de las hojas de los sauces cercanos –sauces que no habían sido atacados– también parecía deteriorarse. Quizás, apuntaba Rhoades, el árbol atacado produce una señal análoga a la feromona de alarma de un insecto, que viaja por el aire para inducir respuestas defensivas en los árboles de la vecindad, no atacados.

Schultz y Balwin verificaron la hipótesis de Rhoades plantando retoños de arce del azúcar, *Acer saccharum*, en dos cámaras de cultivo independientes. Encontraron que las plantas dañadas intencionadamente, así como las de la misma cámara de cultivo, tendían a producir mayor cantidad de taninos y fenoles, dos compuestos defensivos, que las plantas que crecían en la otra. Aunque estos estudios no han demostrado de forma concluyente la existencia de defensa química comunicativa en las plantas, han suscitado gran interés para demostrar que la comunicación feromonal entre los árboles es una realidad.

Los estudios químicos y bioquímicos de los compuestos aleloquímicos protectores de las plantas superiores pueden contribuir, y de forma importante, a futuros esfuerzos por controlar la depredación de los cultivos por plagas de insectos. Un informe reciente de la Academia Nacional de Ciencias estadounidense hacía hincapié en el número creciente de insectos que han desarrollado resistencia a los agentes químicos disponibles. Los estudios químicos y biológicos, sujeto de tratamiento de la ecología química, pueden descubrir insecticidas eficaces, menos peligros para el medio ambiente y no tan fáciles de burlar. Los productos naturales poseen la ventaja de las estructuras que han demostrado sobradamente su eficacia. Ofrecen, además, excelentes oportunidades de creación de sistemas experimentales para investigar la capacidad de los insectos de hacer frente a los compuestos tóxicos y, de este modo, posibilitan el minado de la misma. Los productos naturales pueden también facilitar el surgimiento de nuevas aproximaciones, sin plaguicidas, al control de los herbívoros. Cabría la posibilidad de aprovechar compuestos naturales que impidieran la alimentación o la puesta de huevos, o incluso plantar cultivos de los que se hubieran eliminado las substancias naturales que atraen a los herbívoros o estimulan su comportamiento de alimentación.

Datación de radiocarbono mediante espectrometría

Al aislar de otros átomos el carbono 14 radiactivo en una muestra se abre el camino a una cronología más ajustada de restos arqueológicos y antropológicos mucho menores

Robert E. M. Hedges y John A. J. Gowlett

En la datación de radiocarbono tienen arqueólogos y antropólogos su herramienta principal para confeccionar el calendario de los últimos 50.000 años. El método se basa en la asimilación de un isótopo radiactivo, el carbono 14, dentro de la estructura molecular de los organismos. Porque una población de átomos radiactivos se desintegra a un ritmo regular, éstos pueden actuar como un reloj que registre cuánto tiempo hace de la muerte de un determinado animal o planta. Y tan es así, que resulta muy raro abrir un informe arqueológico que no contenga alguna referencia a la datación de carbono.

Pero se trata de una valiosa herramienta con varias limitaciones. Primera: necesita gran cantidad de material para realizar mediciones fiables, siendo así que buena parte de los artefactos que encierran un destacado valor arqueológico sólo se encuentran dispersos en restos minúsculos. Y los objetos cuyos restos abundan han podido atravesar una compleja "historia carbonosa": fuentes de distintas edades pudieron contribuir al contenido total de carbono del objeto antes de su enterramiento; ello si el objeto no quedó contaminado, después de su enterramiento, por carbono "actual". Aunque gracias a refinados métodos de laboratorio se limpian los contaminantes, cada purificación requiere grandes cantidades de material arqueológico en bruto.

La técnica convencional halla también limitaciones en su campo de aplicación: sólo se obtienen datos fiables para artículos con menos de 40.000 años de antigüedad; cuesta separar, de la radiación de fondo, las emanaciones radiactivas de objetos más antiguos. Se trata de una cortapisa frustrante para los arqueólogos y antropólogos, pues el período comprendido entre 25.000 y 75.000 años atrás constituyó una fase crucial en la aparición del hombre moderno y vino acompañada de interesantes cambios climáticos y faunísticos.

Se ha desarrollado una nueva forma de datación de radiocarbono que no se ve condicionada por esas limitaciones. Recurre al acelerador de partículas en combinación con el espectrómetro de masas. El método permite al investigador el contaje del número de átomos de carbono 14, directamente, sin tener que pasar por la medición de su tasa de desintegración; precisa, por tanto, una muestra mucho menor que la usada para una datación habitual de radiocarbono. Aunque su rango operativo y su exactitud son, hoy por hoy, comparables con los de la datación convencional, podría lograrse pronto la duplicación del rango y la reducción hasta la mitad del margen de error.

La datación de radiocarbono de una muestra es posible gracias a que, de cada billón (10^{12}) de átomos de carbono de la materia orgánica, uno lo es de carbono 14. Si bien en la mayoría de los casos no lo podemos distinguir químicamente de los demás isótopos estables (carbono 12 y carbono 13), el 14 puede detectarse por la radiactividad que genera al desintegrarse en nitrógeno 14.

Se llama vida media a la velocidad a la que una población de átomos radiactivos se desintegra. La vida media del carbono 14 es de unos 5700 años. Esto significa que una muestra que albergue 10.000 átomos de C-14 debería contener sólo la mitad, o sea, 5000, transcurridos 5700 años (los otros 5000 se habrían convertido en nitrógeno 14). Pasados otros 5700 años, sólo quedarían 2500 átomos de C-14, y así sucesivamente. Si se conoce la cantidad original de C-14 de una muestra, puede calcularse fácilmente la edad de ésta determinando cuántas vidas medias tuvieron que transcurrir para dar cuenta del nivel residual de radiactividad de C-14 observado en la muestra.

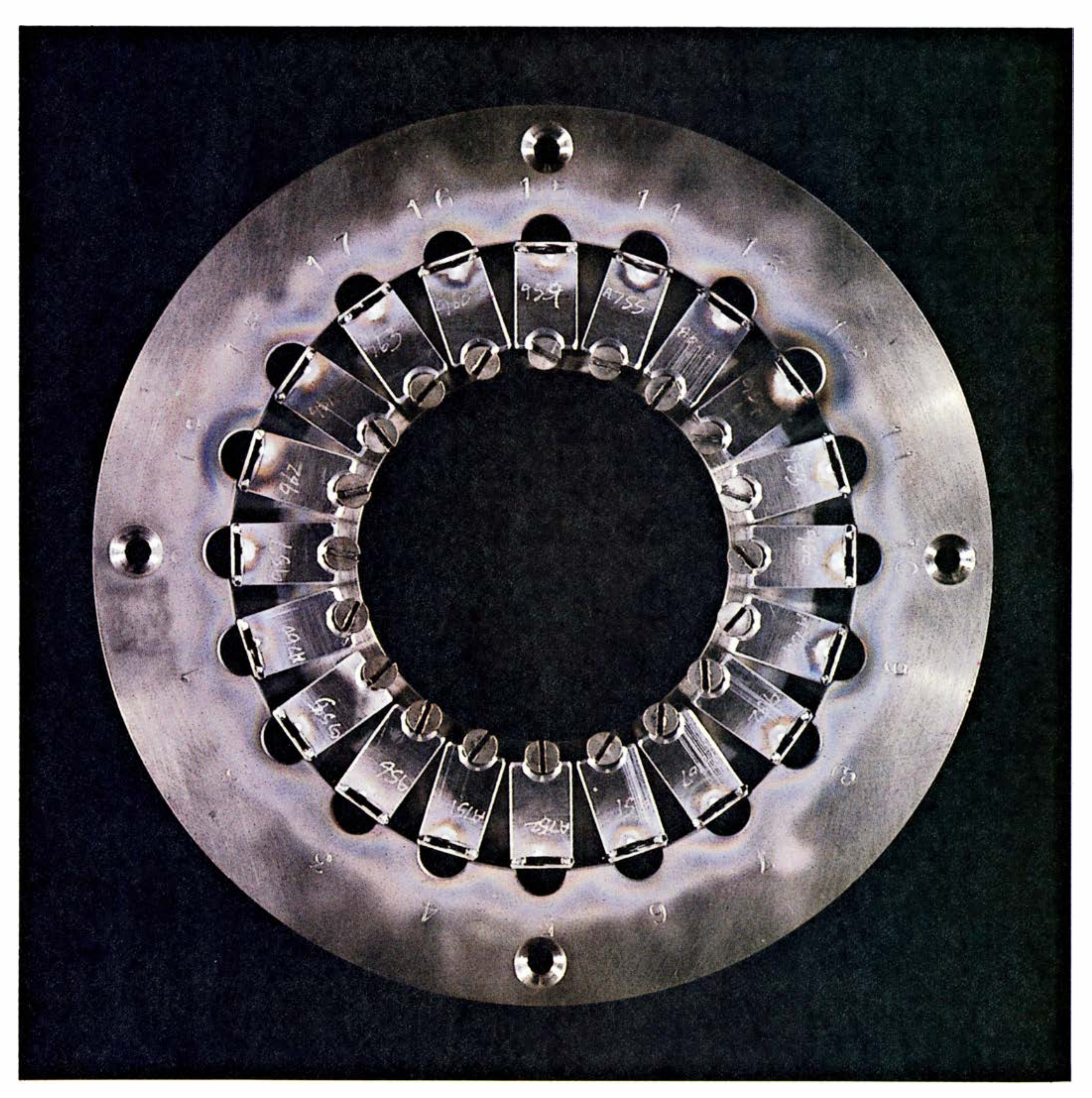
Afortunadamente, el porcentaje original entre los átomos de C-14 por átomos de carbono en cualquier sustancia orgánica se conoce bastante bien. La razón de ello reside en la cantidad de C-14 de la biosfera, que ha permanecido extraordinariamente constante durante largo tiempo. El C-14 se produce incesantemente en la atmósfera superior por la interacción entre los rayos cósmicos y los átomos de nitrógeno. El C-14 se combina con el oxígeno para formar dióxido de carbono radiactivo, que se difunde hacia la atmósfera inferior y entra en la biosfera principalmente a través de la respiración vegetal. De las plantas, el C-14 pasa, a través de la cadena alimentaria, a los animales superiores, incluido el hombre. El aparejado efecto de pérdida radiactiva y producción estratosférica ha establecido un constante, aunque frágil, equilibrio de concentración de C-14 en la biosfera. Por tanto, la totalidad de los organismos vivientes presentan (y han presentado) la misma razón de C-14 a C-12 en su cuerpo.

Muerto el organismo, no puede ingerir más compuestos carbonados. En consecuencia, el C-14 de su cuerpo ya no se remplaza y la concentración que del mismo posee comienza a bajar en virtud de la desintegración radiactiva. Siempre que estos restos del organismo no se contaminen por modernos compuestos de C-14 (depositados por bacterias, por ejemplo), basta medir la razón actual de C-14 a C-12 en dichas muestras para determinar cuánto tiempo hace que el organismo dejó de existir.

Las cronologías establecidas por datación de radiocarbono en muestras de madera han sido verificadas por com-

paración con las cronologías obtenidas por contaje de anillos de crecimiento anuales de aquéllas. De acuerdo con los resultados, la relación C-14/C-12 no ha permanecido siempre constante. El número de rayos cósmicos que chocan en la atmósfera para producir C-14 está condicionado por las perturbaciones del campo magnético solar y quizá también por las fluctuaciones del campo magnético terrestre. En cualquier caso, la razón C-14/C-12 puede ajustarse para corregir estas variaciones. Mayor dificultad revisten las grandes cantidades de material necesario para calcular la fracción de C-14 de una muestra a través de la técnica tradicional: midiendo la radiactividad del espécimen.

La débil radiación emitida por el C-14 no se distingue fácilmente de la radiación ambiental de fondo (generada en su mayor parte por rayos cósmicos que han atravesado la atmósfera). De hecho, si el objeto tiene más de 37.000 años, la radiactividad residual del C-14 es demasiado tenue y no hay forma de separarla del nivel de radiación de fondo. Se necesitan, pues, muchos átomos de C-14 (o un prolongado tiempo de medición) para que la radiación espontánea pueda calibrarse incluso por los detectores de radiactividad más sensibles. La precisión de la medición exige todavía más átomos de C-14. (La precisión de una edad calculada es inversamente proporcional a la raíz cuadrada del número de "cómputos" de radiactividad.) Detectar unas 10.000 desintegraciones radiactivas de C-14 en un período de tiempo razonable (suficiente para una datación con un error inferior a 80 años) requiere de



1. DISCO PORTAMUESTRAS del acelerador de radiocarbono en el laboratorio de los autores; lleva 20 lengüetas metálicas dispuestas en forma de pétalos iguales que sirven para sujetar las muestras de carbono de los especímenes sujetos a datación (y muestras de edad conocida o contenidos de C-14 necesarios en la calibración). El carbono se deposita como una fina capa de grafito sobre un trozo de alambre de tantalio, colocado en el surco abierto al otro extremo de cada lengüeta. El disco se introduce en el interior de una fuente de iones del acelerador, donde cada una de las muestras se va ionizando a su vez [*véase la figura 5*]. Los átomos de carbono-14 se separan de entre los iones producidos y se procede a su cómputo; su número es función de la edad del espécimen.

uno a cinco gramos de carbono puro. Y para obtener esa cantidad se necesita una muestra de materia orgánica varias veces mayor: desde 25 gramos hasta un kilogramo, en función del contenido de carbono del material.

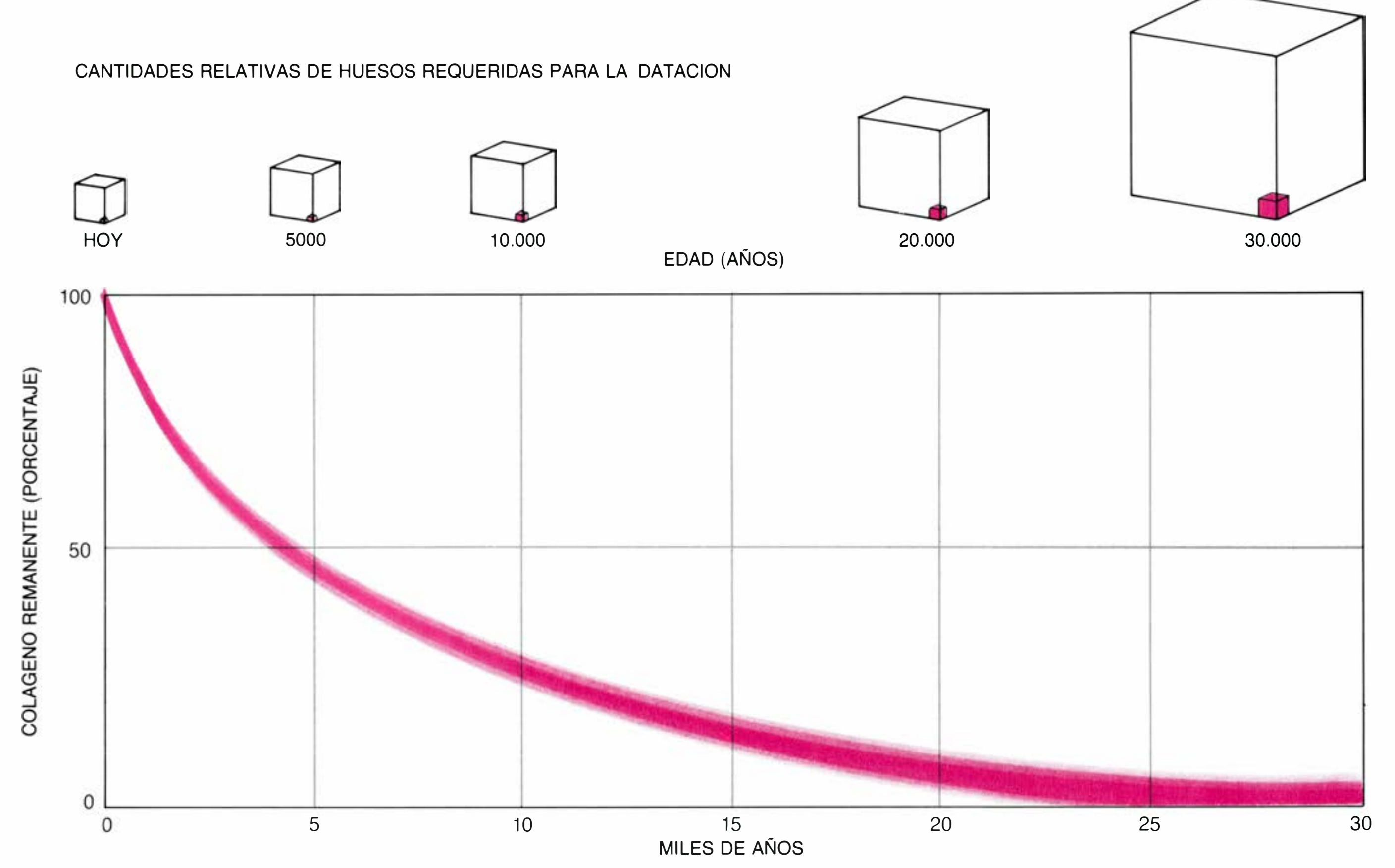
Es fácil ver que si pudiéramos separar los átomos de C-12 y C-13 de los átomos de C-14, en una muestra de carbono de masa conocida, y contar entonces todos los átomos de C-14 (no sólo los que se desintegran radiactivamente), alcanzaríamos unos óptimos rendimientos. Esa eficacia en la medición del C-14 contenido en la muestra podría traducirse luego en una dilatación temporal del rango operativo y en una mayor precisión en la datación. Pues bien, tal es lo que hemos conseguido, en parte, en nuestro acelerador de radiocarbono de la Universidad de Oxford.

Comenzamos por ionizar los átomos de carbono de la muestra. Se aceleran luego hasta alcanzar energías de unos 10 millones de electronvolt. El "haz" de iones de alta energía así creado corre a través de un campo magnético que obliga al haz a curvarse. Los átomos más ligeros tienden a curvarse con mayor precisión que los pesados; y así, se adentran en el haz divergente. Gracias a ese mecanismo podemos aislar, de otros átomos, los iones de C-14 que hay en la muestra y contarlos. (La cantidad encerrada de C-12 y C-13 se calcula hallando la diferencia de masa entre la muestra original de carbono y la masa total de C-14 detectada.)

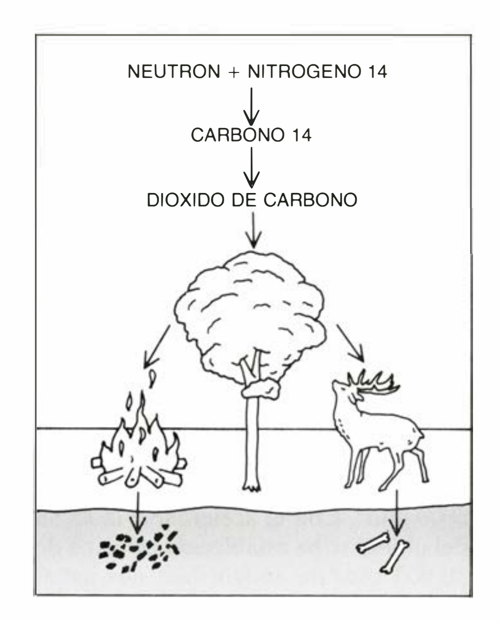
Los aceleradores electrostáticos como el nuestro de radiocarbono de Oxford aprovechan las fuerzas entre cargas eléctricas para acelerar los átomos. Por eso hay que ionizar antes los átomos de la muestra a analizar. En el acelerador de Oxford, una carga positiva equivalente a unos 2,5 millones de volt "arranca" iones negativos de carbono y, una vez despojados de sus electrones, los "induce a proseguir" como iones positivos el resto del camino [*véase la figura 5*]. El extractor, que arrebata cuatro electrones de los iones de carbono para conferir a éstos una triple carga positiva (medida en unidades de carga electrónicas), provoca también que algunos iones moleculares errantes se rompan en iones atómicos. Con esto eliminan las muchas moléculas de masa 14 que resultarían indistinguibles de los átomos de C-14.

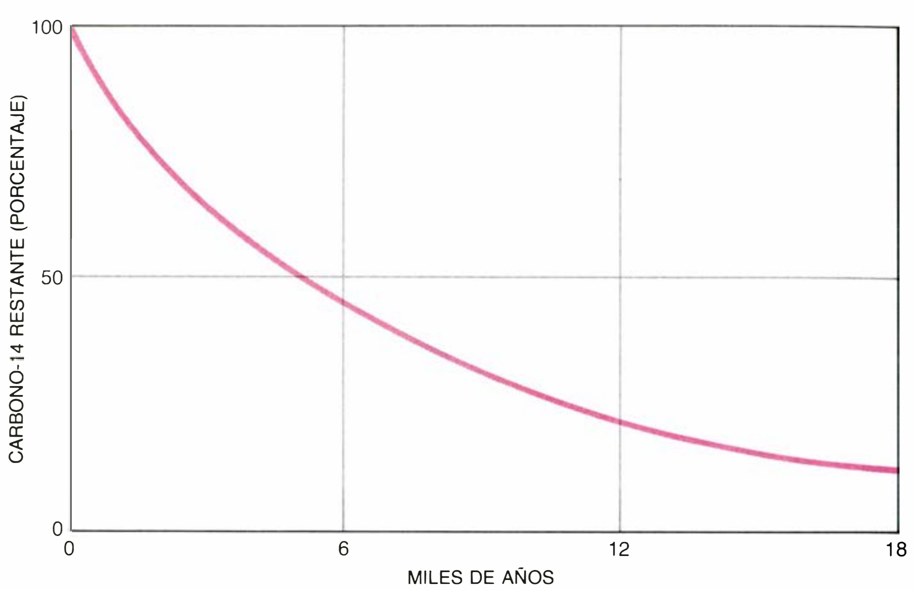
El espectrómetro de masas saca partido también de las fuerzas magnéticas. Los imanes, además de focalizar y dirigir el haz de iones, ordenan a éstos en razón de su masa. Si se someten iones de carga y velocidad similares, pero de diferente masa, a un campo magnético perpendicular a su dirección de avance, sólo los iones de masa igual atravesarían una rendija de un radio de curvatura determinado instalada más allá del imán. En este sentido, un imán podría "retener" todas las partículas cargadas, salvo las de masa atómica 14. Pero no todos los iones acelerados presentan idéntica carga y velocidad; y así cuantos variasen en masa, carga y velocidad atravesarían la rendija allende el imán. No obstante, los iones que interfieren se reducen en nuestro espectrómetro de masas por acelerador en un factor de 10.000 millones con dos de tales imanes: uno actúa sobre los iones antes de su aceleración y el otro después.

Las partículas aceleradas sufren una nueva selección a través de un filtro de velocidad formado por campos magnéticos y eléctricos uniformes, perpen-



2. LA CANTIDAD DE HUESO necesaria para la datación de radiocarbono depende de la antigüedad del hueso, su estado de conservación y el método de datación empleado. La exigua cuantía de la misma que se precisa para la datación por espectrometría de masas por acelerador (*cubos coloreados*) es mil veces menor que la exigida para la datación a través de los métodos de radiocarbono al uso, con independencia de la antigüedad del espécimen en cuestión. Para no caer en el error de medir el carbono 14 contenido en carbono moderno (depositado éste en el hueso con posterioridad a su enterramiento), que nos daría una baja estimación de su edad, se procede a calcular el contenido de C-14 que encierran aminoácidos purificados y derivados específicamente de un único componente del hueso: el colágeno proteínico. Puesto que el colágeno se deteriora con el tiempo (*base*), se necesita abundante cantidad de muestra para huesos antiguos. La difuminación de la curva refleja que el porcentaje de edad del colágeno puede variar según las condiciones de conservación de la muestra.





3. SE PRODUCE CARBONO C-14 en cantidades traza cuando neutrones de rayos cósmicos interaccionan con átomos de nitrógeno en la atmósfera (*izquierda*). El C-14, que es un isótopo radiactivo del carbono, se combina entonces con el oxígeno para formar dióxido de carbono. Igual que el dióxido de carbono normal (que contiene carbono 12), la especie radiactiva penetra en la biosfera a través de la respiración vegetal; comparten la misma química del carbono. El C-14 asciende desde la base de la cadena alimentaria incorporándose también en los tejidos de los organismos superiores. La continua aportación de carbono 14 a la biosfera queda equilibrada por la pérdida incesante a través de la desintegración radiactiva (*derecha*), estableciéndose así una concentración casi constante de C-14 en todos los animales y plantas. Sin embargo, cuando muere un organismo, el C-14 de sus tejidos ya no puede ser reemplazado y predomina la desintegración radiactiva. Gracias a conocerse la concentración de C-14 en los organismos, puede calcularse la edad de los restos orgánicos con sólo medir el contenido en carbono 14 de una muestra de los restos y computar cuánto tiempo hubo de transcurrir hasta llegar a la disminución observada en el registro.

diculares entre sí y al haz de iones. Con ello se rebaja el número de iones no deseados en otro factor aproximado de 1000 antes de que los iones portadores de triple carga positiva y de masa atómica 14 (es decir, los iones de C-14) se recuenten finalmente en un detector de energía. Aparato éste que distingue iones de masa y velocidad iguales y diferente carga nuclear apoyándose en su ritmo de pérdida de energía al colisionar con las moléculas de un gas. Tan sensible es el detector que puede identificar la inmensa mayoría de iones de C-14, aun cuando estos constituyan menos del 1 por ciento del haz de iones incidente, como podría ser el caso de una muestra muy antigua (por ejemplo, de 60.000 años de antigüedad).

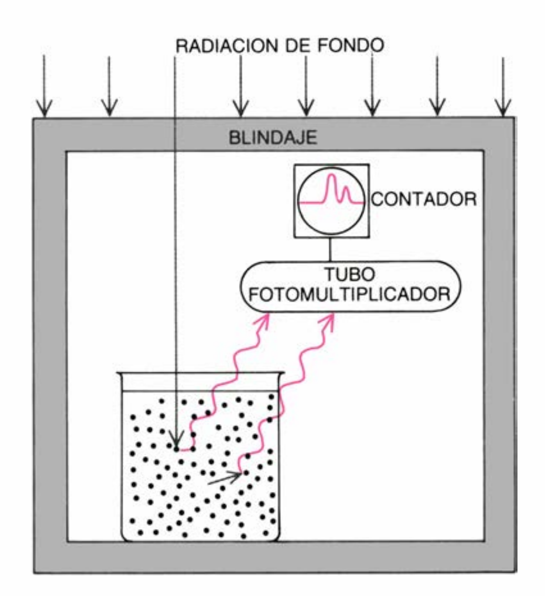
Hoy, la espectrometría de masas por acelerador permite detectar más de un 2 por ciento del total de átomos de C-14 de una muestra de edad "promedio" (cifrada en torno a los 12.000 años de antigüedad) en un período de horas. Aunque puede parecernos un porcentaje pequeño y demasiado tiempo, piénsese que habrían de transcurrir 170 años antes de que el 2 por ciento de los átomos de C-14 de una muestra se manifestara en forma de radiactividad, cualquiera que fuere el tamaño del espécimen. Para detectar 10.000 átomos de C-14 en tal muestra promedio por espectrometría de masas por acelerador basta con medio a cinco miligramos de carbono puro, una cantidad 1000 veces menor que las requeridas para las mediciones habituales de C-14.

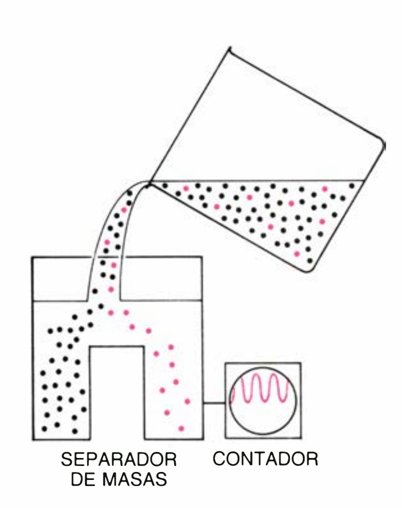
Antes de ionizar y acelerar en nuestra máquina los átomos de carbono del material que nos interesa fechar, hay que purificar la muestra (eliminación del carbono moderno) y convertirlos en grafito, una forma de carbono sólido. Tratando el espécimen con productos químicos que reaccionan de un modo selectivo con determinados tipos de compuestos del carbono, podemos extraer, para su datación, una única fuente de carbono del objeto arqueológico. Adviértase, en efecto, que los huesos pueden adquirir carbonatos del agua subterránea, ser víctimas de hongos o bacterias, así como absorber compuestos orgánicos del suelo. Todos estos procesos introducen carbono extraño en los especímenes óseos que pueden dar una lectura de C-14 que induzca al error, en particular si el resto desenterrado es muy antiguo. Sin embargo, el principal componente orgánico de los huesos es el colágeno proteínico. Uno de los aminoácidos que forman el colágeno, la hidroxiprolina, presenta la gran ventaja de localizarse exclusivamente en los huesos. Por consiguiente, si se prepara una muestra de hidroxiprolina a partir de un espécimen óseo, se puede asegurar que el carbono contenido en la muestra entró en el hueso durante la formación del mismo, y no posteriormente.

Aislado ya el componente de interés, hay que proceder a su conversión en grafito puro. Nosotros lo hacemos quemando el compuesto para producir gas de dióxido de carbono; el gas se convierte luego en acetileno (C_2H_2), que deposita una capa pura de carbono sobre un alambre de tantalio caliente.

Los iones de carbono negativamente cargados pueden producirse entonces a partir de la capa de carbono por bombardeo de ésta con iones de cesio positivos. (Fuente de iones llamada también fuente de chisporroteo.) Comenzando con iones de carbono negativamente cargados, eliminamos la engorrosa contaminación por nitrógeno 14 (el N-14 tiene una masa casi idéntica al C-14), ya que el nitrógeno no existe en forma de ion negativo. Aunque la fuente de chisporroteo aporta un haz estable de iones que posteriormente puede acelerarse, tan sólo el 10 por ciento del carbono depositado se transforma en iones. (En nuestro laboratorio estamos preparando una fuente de iones de dióxido de carbono que, además de resultar más eficaz, simplifica en gran medida la química en la disposición de la muestra para su ionización.)

Apoyados en que el espectrómetro de masas por acelerador permite detectar casi cualquier isótopo por debajo de unos niveles de abundancia de una parte por trillón (10^{15}), cabe imaginar que este aparato podría extender la datación de radiocarbono, por lo menos, a objetos cuya edad se remontara a 80.000 años de antigüedad. Sin embargo, hoy por hoy, nos vemos limitados por una cortapisa apremiante: la





4. DIFERENCIA ESENCIAL entre los métodos de datación de radiocarbono al uso (*izquierda*) y los que emplean un espectrómetro de masas: estriba en la forma como se mide la concentración de C-14. Se suele calcular el número de átomos de C-14 (*puntos coloreados*) de una muestra a partir del número de desintegraciones radiactivas detectadas en un intervalo determinado de tiempo. Aquí, la radiación procedente de un átomo de C-14 (*flecha negra*) provoca que una molécula teñida y fluorescente emita un destello de luz (*ondas coloreadas*), que lo registrará un tubo fotomultiplicador. La radiación de fondo natural puede producir también que las moléculas teñidas centelleen y distorsionen los resultados. El blindaje atenúa esta radiación hasta un nivel inferior al de la radiactividad que presentan las muestras de edad "promedio", de suerte que pueda quedar anulada. Ahora bien, las muestras antiguas de carbono son menos radiactivas; su nivel de radiactividad se aproxima al de la radiación de fondo ambiental. Y tenemos así que, cuando se trata de objetos cuya antigüedad trasciende los 37.000 años, la radiación de fondo obscurece la radiación de la muestra. En un espectrómetro de masas por acelerador los átomos de C-14 se separan de todos los demás átomos y se "cuentan" directamente. En este método, el único factor limitante es la contaminación química.

introducción de pequeñas cantidades contaminantes de carbono actual durante el procesado de la muestra. Esto limita la capacidad de datación a un período de unos 40.000 años, que viene a corresponderse con el techo de la datación convencional de radiocarbono. En el caso de la espectrometría de masas por acelerador dicho límite no es crítico. Mejoras en el procedimiento perfeccionarán su sensibilidad.

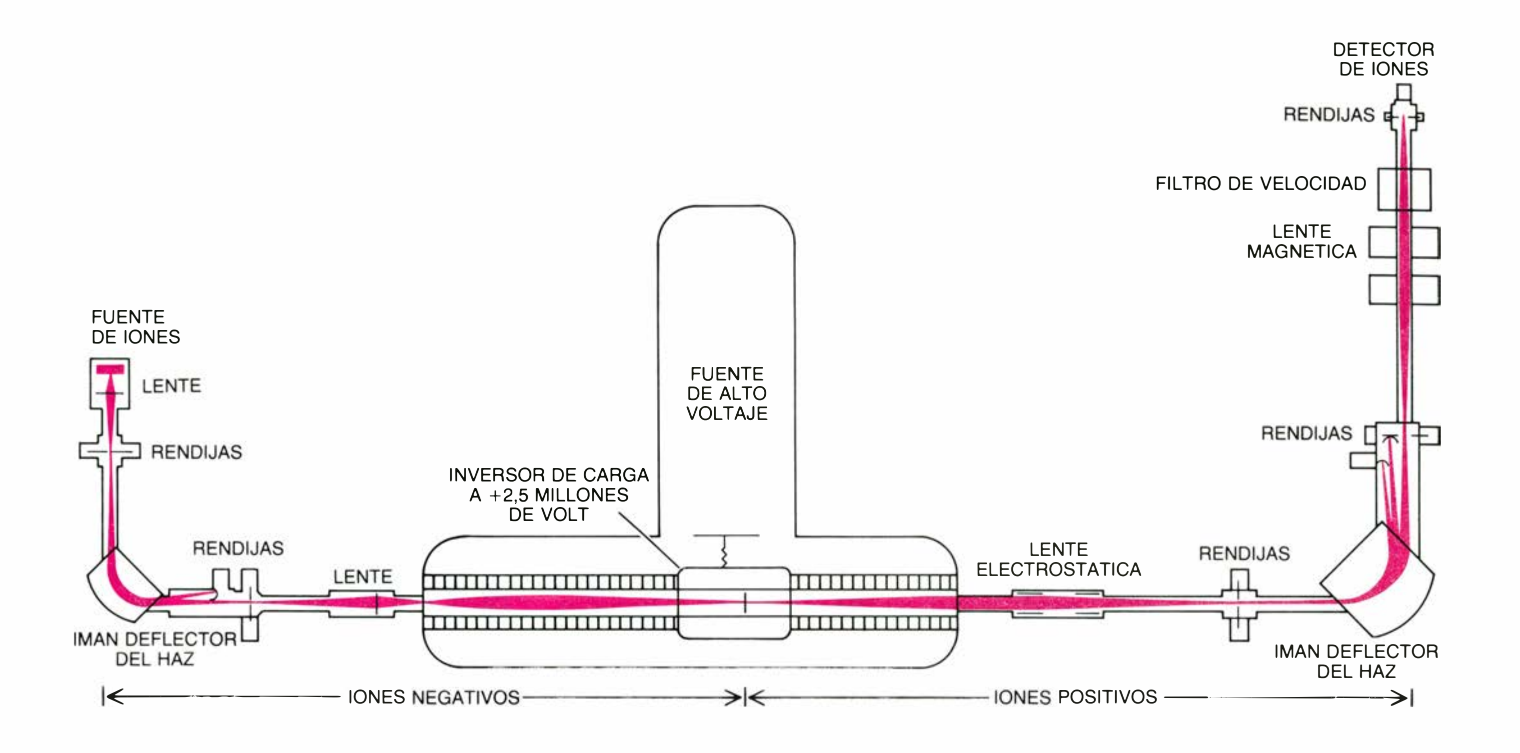
El coste de la datación de radiocarbono por espectrometría de masas por acelerador supera en 1,5 o 2,5 veces los gastos de la datación convencional. Para materiales por encima de los 10.000 años la precisión de ambos métodos viene a ser equiparable. Aunque existe la posibilidad de obtener fechas más ajustadas con la técnica del acelerador, de momento el prestigio del nuevo método radica en su capacidad para datar muestras 1000 veces menores que las requeridas por las técnicas tradicionales. La datación de radiocarbono por acelerador resulta, pues, más eficaz en los tres casos siguientes: cuando el muestreo tiene que reducirse al mínimo para poner límite a la destrucción del artefacto; cuando, de salida, sólo hay muestras diminutas, y cuando se urge una selectividad de las muestras de precisa estratigrafía y composición química.

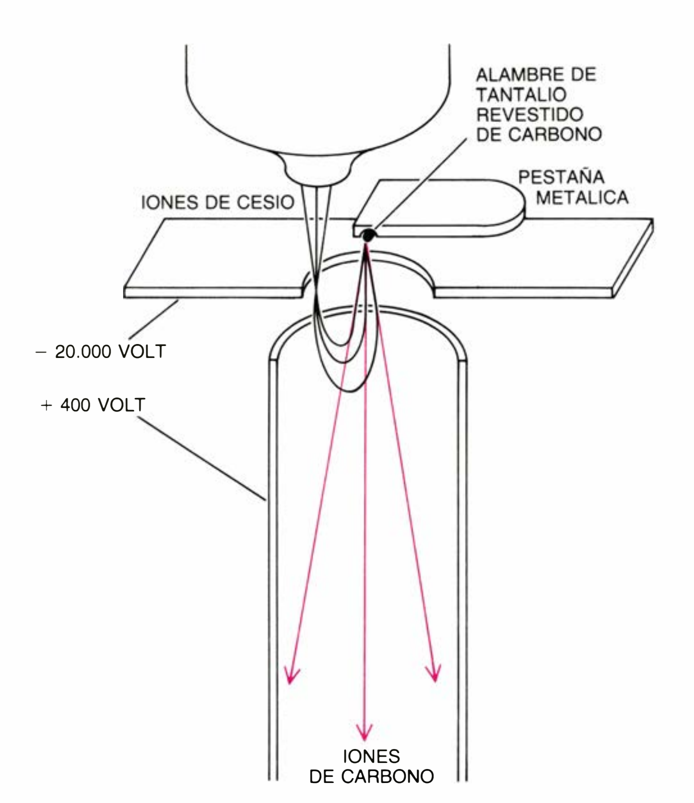
Pensemos, por ejemplo, en muchos manuscritos antiguos, demasiado valiosos para dejarlos a la basta manipulación de la datación convencional de radiocarbono. La datación por acelerador reduce al mínimo la cantidad de material que habría de sacrificarse. Un fragmento de un primitivo mapamundi medieval perteneciente al ducado de Cornwall, que se ha conservado gracias a su reutilización como forro de un libro, se ha podido fechar a partir de un trozo pequeño. Se trata, cabe afirmar con bastante seguridad, de un ejemplar más antiguo que el único otro existente, conservado en la catedral británica de Worcester. Aplicado en este campo, el método del acelerador de radiocarbono permite verificar muchas fechas paleográficas (dataciones basadas en el estudio de loe estilos de escritura) y desenmascarar falsificaciones. Los manuscritos originales del Nuevo Testamento o fragmentos de papiro serían materiales ideales para someter a esta prueba.

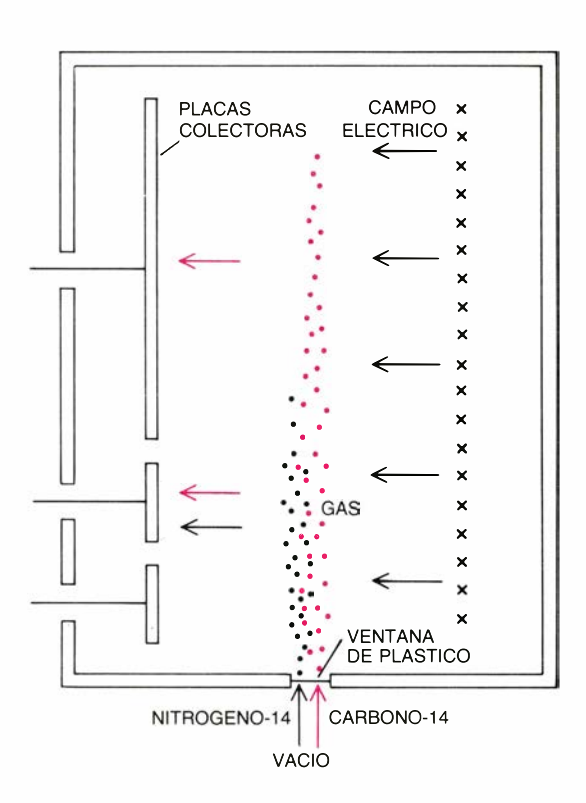
En muchos yacimientos arqueológicos los materiales sujetos a datación, demasiado pequeños, no pueden aprovecharse como muestras. De ahí que se opte por mezclarlos y así conformar una muestra cuyo tamaño sí permita el proceso de datación. El inconveniente obvio del caso es que pueden mezclarse y muestrearse a la vez elementos correspondientes a períodos muy distintos. En muchas ocasiones, la espectrometría de masas por acelerador ofrece otra opción: deja a los investigadores la posibilidad de datar muestras individuales, en vez de agregados de las mismas. Eso ocurre, en particular, con fragmentos de útiles de hueso o de cornamenta trabajados durante el Paleolítico, hace más de 10.000 años. Apoyándonos en los conocimientos actuales del arte prehistórico, a una mandíbula de caballo tallada, desenterrada hace una centuria en el norte de Gales, se le podía atribuir una antigüedad de 25.000 años o una "modernidad" de 5000 años. Con el acelerador, la fecha del objeto se ha establecido en cerca de 10.000 años de antigüedad; nos hallamos, pues, ante una importante contribución al catálogo artístico del Paleolítico tardío. Además, queda corroborada también la persistencia del caballo del Pleistoceno en períodos modernos.

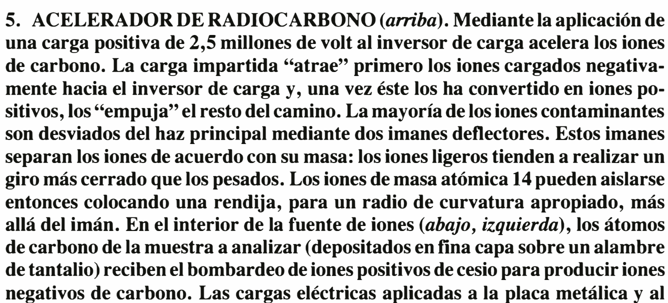
Las cabezas de los arpones de hueso o cornamenta del último período glaciar, objetos bastante más delicados, han llegado hasta nosotros en buen estado de conservación y así puede obtenerse una datación a partir de la muestra sacada de una pequeña perforación. Los útiles, la industria persistente de la edad de piedra, pueden fecharse analizando la resina de los mangos o las ligaduras que ataban el mango de madera a la piedra tallada. A veces, las puntas de lanza y hojas de hacha de bronce de épocas más cercanas se recuperaron junto con pequeños fragmentos de su mango de madera todavía atados. Midiendo el contenido de C-14 en estos restos se ha fechado una punta de lanza encontrada en la cueva de Jackscar, Inglaterra septentrional. De forma similar se dató un martillo-hacha del Bronce primitivo; el espécimen procedía de un horizonte conservado, del bosque de Cleethorpes, en la costa oriental inglesa. Vale la pena señalar que la edad de 3 tocones adyacentes era de mil años menos que la herramienta. Años atrás, esos tocones podían haber servido para datar, por asociación, el martillo-hacha.

Las edades de las puntas de proyectiles y de arpones de hueso han suministrado importantes pistas en la reconstrucción de la expansión hacia el norte de la especie humana en la Europa del último período glaciar; fragmentos de hueso de reno y de carbón vegetal degradado, encontrados en campamentos antiguos, pueden aportar una información similar. Aunque los yacimientos a cielo abierto son mu-

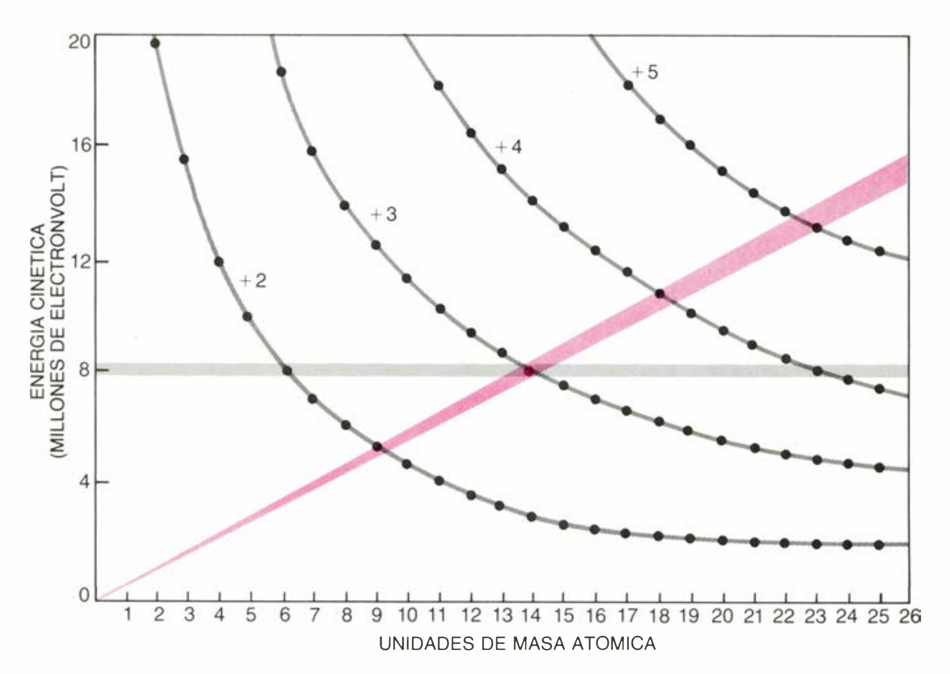








5. ACELERADOR DE RADIOCARBONO (*arriba*). Mediante la aplicación de una carga positiva de 2,5 millones de volt al inversor de carga acelera los iones de carbono. La carga impartida "atrae" primero los iones cargados negativamente hacia el inversor de carga y, una vez éste los ha convertido en iones positivos, los "empuja" el resto del camino. La mayoría de los iones contaminantes son desviados del haz principal mediante dos imanes deflectores. Estos imanes separan los iones de acuerdo con su masa: los iones ligeros tienden a realizar un giro más cerrado que los pesados. Los iones de masa atómica 14 pueden aislarse entonces colocando una rendija, para un radio de curvatura apropiado, más allá del imán. En el interior de la fuente de iones (*abajo, izquierda*), los átomos de carbono de la muestra a analizar (depositados en fina capa sobre un alambre de tantalio) reciben el bombardeo de iones positivos de cesio para producir iones negativos de carbono. Las cargas eléctricas aplicadas a la placa metálica y al cilindro del mecanismo (*mostrados aquí en corte*) dirigen los iones de cesio hacia la muestra de carbono y aleja de ésta a los iones de carbono. Por último, los iones de C-14 se distinguen de los iones contaminantes sobrantes por un detector (*abajo, derecha*). Tras atravesar una ventana de plástico, los iones acelerados viajan a través de una cámara repleta de gas, donde producen plumas de iones secundarios. Debido a que la velocidad y la carga atómica de los iones que avanzan son similares, la tasa de interacción entre los iones y las moléculas de gas depende sobre todo de la carga nuclear del ion. Así pues, los iones de carbono (*puntos coloreados*), que presentan una carga nuclear +6, interaccionan en menor proporción que los iones de nitrógeno (*puntos negros*), que tienen una carga nuclear +7, y recorren una mayor longitud antes de ionizar el gas. Un campo eléctrico induce que las plumas de iones se desvíen hacia las placas colectoras, donde se miden sus longitudes promedio, que nos darán los iones de C-14.



6. SELECCION DE IONES C-14 triplemente cargados. Cabe realizarla a través de la aplicación de tres dispositivos: un deflector magnético, un filtro de velocidad y un detector de energía. El radio de la curva trazada por un ion sujeto a un campo magnético es una función de la masa, la carga y la velocidad de ion o, equivalentemente, de su energía cinética. Los iones que atraviesan una rendija en el sentido del flujo magnético (*puntos*) muestran, por tanto, una distribución de masas, cargas y energías. Cuando se llevan a una gráfica, encontramos una familia de hipérbolas (*curvas grises*), una por cada carga iónica posible. La energía cinética de los iones que pasan a través de un filtro de velocidad constituye una función lineal de la masa atómica (*banda de color claro*). Por tanto, cuando el filtro opera en conjunción con el deflector magnético seleccionará un ion de cada posible hipérbola de energía en función de la masa. La selección final corre a cargo del detector de energía (*banda gris*). Tiene por misión detectar sólo iones con una energía cinética de ocho millones de electronvolt; así se individualiza un ion triplemente cargado del átomo de masa 14.

cho más numerosos que los localizados en cuevas, la probabilidad de encontrar en ellos fragmentos idóneos para una datación convencional de carbono es menor. Por contra, gracias a la datación por acelerador se ha reconstruido una sólida cronología de radiocarbono a partir de los huesos desenterrados en los yacimientos clave, a cielo abierto, de Pincevent, Etiolles y Marsangy. Se cree hoy que Pincevent sobrepasa en poco los 12.000 años de antigüedad, y esta edad, determinada por el acelerador, concuerda razonablemente bien con algunas dataciones convencionales recientes. El acelerador de radiocarbono muestra también que Pincevent es unos 1000 años más joven que Etiolles, aunque más antiguo que Marsangy. De este modo, Pincevent vendría a ser contemporáneo de los hallazgos arqueológicos recuperados en la cueva de Gough, en el sureste de Inglaterra, y de los restos de un alce desenterrados en el condado de Lancashire; ambos se fecharon también con la ayuda del acelerador. El esqueleto de alce, a su vez, sirvió para datar un par de puntas de proyectil de hueso incrustadas en él, la primera de las cuales se había fechado con anterioridad.

En el pasado los granos vegetales o los huesos dispersos de animales sólo podían datarse en razón del estrato arqueológico donde se los había encontrado. Esa ubicación cronológica, por contexto, reviste interés para delimitar la época de domesticación de animales y plantas. Sin embargo, las grietas abiertas en la tierra, los roedores, los gusanos, los insectos o la actividad humana pueden dispersar esos fragmentos de material orgánico por todo el suelo, y no necesariamente en el orden cronológico de los depósitos geológicos envolventes. La datación por acelerador está perfectamente adaptada para conceder o negar validez a esta vía de inferencia. En este sentido, las mediciones realizadas en nuestro laboratorio y en instalaciones similares de la Universidad de Arizona mostraron que las semillas de cereales y huesos de dátiles desenterrados en un yacimiento de 17.000 años de antigüedad corresponden en realidad a un lapso corto de siglos. Por otra parte, a granos procedentes de otros yacimientos de Oriente Medio se les ha asignado una antigüedad de bastantes milenios, si bien se trata de variedades silvestres. Esta selectividad estratigráfica constituye una importante ventaja de la datación por acelerador; a través de la misma, muestras pequeñas, de interés intrínseco, pueden cotejarse por su contexto estratigráfico.

Otro aspecto de la selectividad que ofrece la datación por acelerador tiene que ver con el tratamiento de la muestra. Al requerirse mucho menos carbono para una medición, se puede conseguir una mayor discriminación en la selección del compuesto de carbono a someter a ensayo. Igual que el colágeno del hueso, un pergamino puede proporcionar una muestra no contaminada de carbono a partir de sus aminoácidos constituyentes. De modo semejante, examinado el contenido de C-14 de los aminoácidos extraídos de la dentina podemos averiguar la fecha de un fragmento de marfil. Este método nos podría permitir datar, con mayor exactitud, la extinción del mamut en Europa occidental analizando microfragmentos de colmillos conservados en yacimientos del Paleolítico. También nos ofrece la posibilidad de preparar, con una sola muestra, distintos compuestos del carbono, lo cual nos aportaría una clave del tipo de contaminación desde otras fuentes de carbono. En este mismo orden, los autores lograron determinar los distintos momentos en los que el carbono penetró en los sedimentos lacustres a partir del análisis de varias fracciones de lípidos contenidos en ellos.

En líneas generales, la datación convencional de radiocarbono ha cartografiado con éxito la secuencia de los últimos 30.000 años de zonas donde se vio favorecida la conservación orgánica. Sin embargo, pasado el umbral de los 20.000 años, el número de objetos cuya edad puede determinarse con certeza cae bruscamente. Por contra, la espectrometría de masas por acelerador puede retrasar bastante más ese umbral.

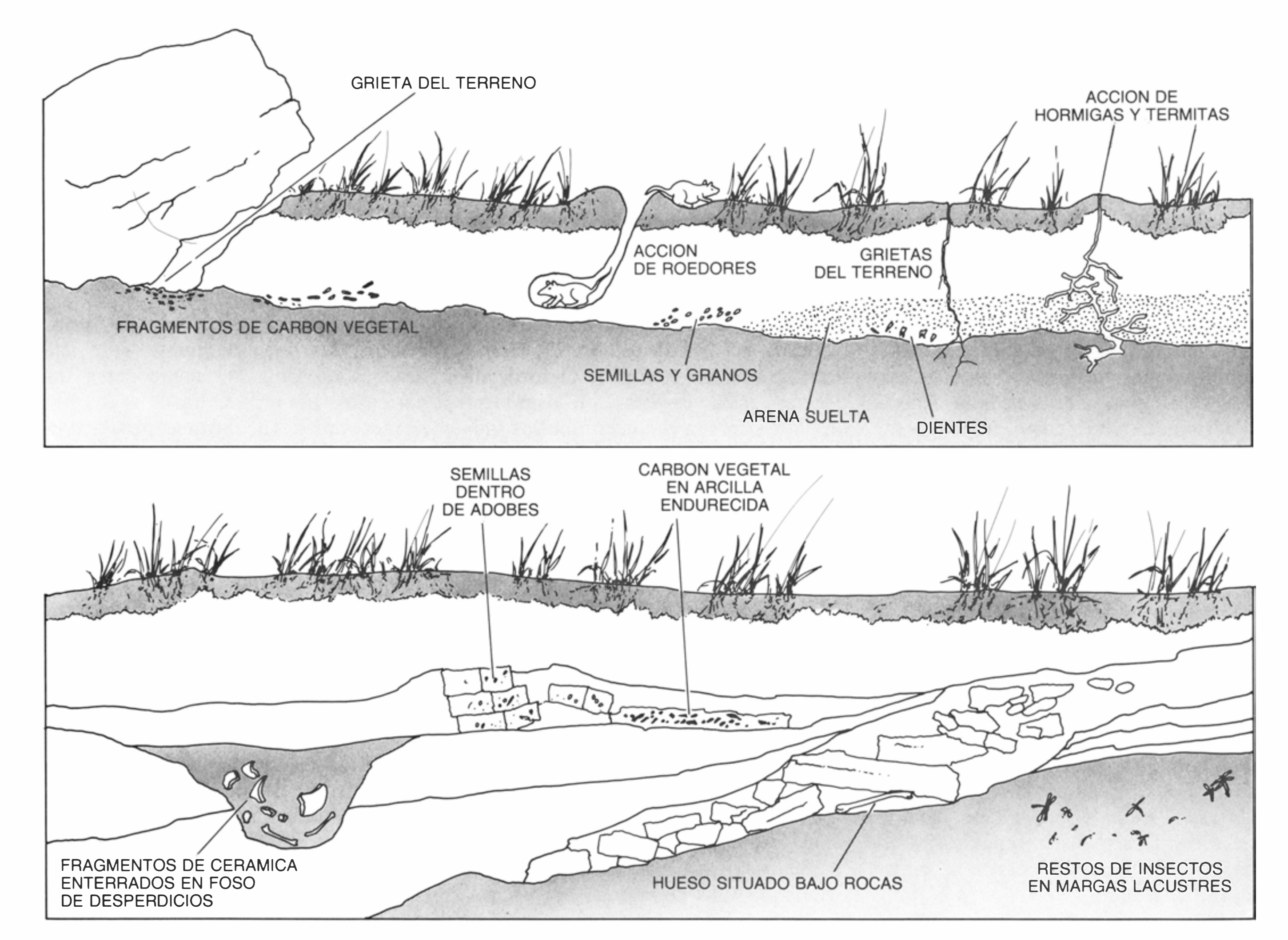
En un horizonte de 40.000 años, la cantidad de C-14 contenida en un hueso o un fragmento de carbón vegetal puede ser realmente exigua: en un ejemplar semejante hallaríamos sólo unos miles de átomos de C-14. Significa ello que cantidades igualmente pequeñas de carbono actual pueden torcer grandemente el sentido de las mediciones. Una contaminación de esa suerte que ronde el 1 por ciento en una muestra de 25.000 años de antigüedad la restaría casi 1500 años de su edad real. Tal contaminación lograría reducir la edad aparente de un objeto de 60.000 años de antigüedad en casi un 50 por ciento. De ahí el obvio interés que encierran los procesos de purificación de muestras en la datación de artefactos antiquísimos. Por desgracia, la manipulación rigurosa del espécimen y los procesos de tratamiento dan por resultado muestras bastante pequeñas, que impiden su fácil estudio por el más bien tosco análisis tradicional de radiocar-

bono. Añádase a ello otro obstáculo, insuperable, con el que tiene que habérselas la datación convencional por radiocarbono: distinguir la radiactividad de la muestra de entre la radiación de fondo ambiental.

Ni el tamaño de la muestra ni la radiación de fondo presentan problemas para la datación mediante acelerador. Así pues, mejoras relativamente menores registradas en la química de la muestra pueden comportar una cronología más fina y dilatada en el tiempo. En este contexto, la datación mediante acelerador de aminoácidos obtenidos a partir de huesos de más de 25.000 años de antigüedad demostraron que su edad había sido antes subestimada en 1000 años o más. Las mediciones anteriores, convencionales, se habían fundado en el colágeno entero, del que no se podía garantizar que se hallara libre de carbono actual.

La nueva técnica de datación se ha dejado sentir en una controversia de largo alcance: la relativa a las primeras migraciones humanas hacia el Nuevo Mundo. Resulta crucial una escala de tiempo precisa de la colonización de América para determinar con qué presteza los primeros cazadores y recolectores paleoindios se dispersaron, establecieron y desarrollaron su diversidad étnica y lingüística. La mayoría de los observadores están de acuerdo en que los primeros habitantes de América vinieron de Asia noriental, hace probablemente entre 25.000 y 12.000 años, cruzando el puente natural que entonces unía Siberia con Alaska. Ahora bien, el desenterramiento de esqueletos humanos en puntos tan dispares del Nuevo Mundo, como Canadá y Perú, parecía contradecir esa tesis, por semejar más antiguos de lo esperado. La espectrometría de masas por acelerador ha desatado el nudo: ningún esqueleto descubierto en América posee más de 12.000 años de antigüedad. Si otros hallazgos se realizan en el futuro, quizá la técnica de espectrometría de masas por acelerador sea la encargada de establecer directamente la edad del espécimen.

La datación mediante acelerador podría también resultar inestimable a la hora de componer una cronología verosímil del hombre del Neanderthal. De acuerdo con los datos que nos suministra la arqueología, habríase producido una desaparición brusca de esta subespecie humana en los comienzos del Paleolítico superior, hace unos 35.000 años. Aunque es demasiado pronto para afirmarlo con seguridad, la datación mediante espectrometría de masas por acelerador podría revelar que el Paleolítico superior y el período que le antecede, el Paleolítico medio, estarían encorchetados en unos límites restringidos e impuestos, sin cabal fundamento, por métodos convencionales de datación. Si ese fuera el caso, el tiempo que duró la desaparición del hombre del Neanderthal se prolongaría mucho más de lo que se ha venido suponiendo.



7. CONTEXTO ESTRATIGRAFICO donde suelen quedar enterrados restos orgánicos antiguos: huesos, dientes, carbón vegetal o semillas. Hemos de examinarlo cuidadosamente antes de que los resultados de la datación de carbono puedan generalizarse al estrato de asiento. Considéranse contextos de dudosa validez (*arriba*) los expuestos a distintos agentes externos que podrían haber dispersado material orgánico. Entendemos por contextos dignos de confianza (*abajo*) aquellos en los cuales los restos a fechar por su contenido de carbono han persistido confinados en una matriz inmovilizadora. Habida cuenta de que el tamaño del material encerrado es pequeño, el espectrómetro de masas constituye la técnica más idónea para datar el estrato en razón de su lugar.

Reconocimiento del parentesco en los renacuajos

Los renacuajos de la rana de las Cascade prefieren asociarse con hermanos, a los que distinguen de los que no lo son. Esa capacidad de reconocer, que no se fundamenta en el trato, quizá tenga componentes genéticos

Andrew R. Blaustein y Richard K. O'Hara

Son muchas las especies animales cuyos miembros forman grupos sociales. Hay bandadas de aves, cardúmenes de peces, bandas de simios; cabe, por tanto, plantearse la pregunta de si algunos de esos grupos se asientan sobre lazos familiares. En otras palabras, ¿pueden algunos animales reconocer el parentesco? ¿Sacan partido de esa capacidad para asociarse con parientes en lugar de hacerlo con individuos no emparentados, y a la vez para evitar aparearse con parientes cercanos? El reconocimiento del parentesco ha constituido últimamente el centro de varias investigaciones llevadas a cabo por estudiosos del comportamiento animal. Dichos estudios conducen, en última instancia, a un enfoque evolutivo que explicaría la cooperación y el altruismo entre animales. Sin embargo, antes de considerar esas implicaciones teóricas resulta preciso saber si los miembros de una especie determinada reconocen efectivamente a sus parientes. Y si lo hacen, cómo lo logran.

Durante los últimos años hemos investigado el comportamiento de reconocimiento del parentesco en renacuajos, o girinos, de varias especies de anuros (ranas y sapos) que abundan en los lagos y estanques de la región del Pacífico nororiental (Estados Unidos). Esos renacuajos reconocen a sus hermanos; en una especie en particular, la capacidad de distinguir entre hermanos y no hermanos es extremadamente sensible. Los renacuajos de la rana de las Cascade, *Rana cascadae*, son capaces de reconocer a sus hermanos sin haberlos visto antes. Prefieren asociarse con sus hermanos antes que con ejemplares no emparentados, y tal preferencia persiste a lo largo de toda su metamorfosis en ranas.

El reconocimiento del parentesco no constituye un rasgo trivial. Se halla intrincadamente ligado al comportamiento cooperativo y "altruista" que muchos animales sociales reservan con preferencia para con sus parientes. El ejemplo clásico de este comportamiento es el de los insectos sociales, como las abejas, que viven en una sociedad organizada, muy especializada y caracterizada por la cooperación y el altruismo. En dichas comunidades, individuos estériles (las obreras) trabajan en provecho de un único individuo fértil (la reina), que es su hermana genética. Sin embargo, ¿por qué favorecen los animales a sus parientes, si tal comportamiento a menudo puede resultarle costoso al individuo?

Buena parte de lo que hoy se sabe sobre la evolución del altruismo procede del trabajo de W. D. Hamilton, de la Universidad de Oxford. Sus teorías para explicar el comportamiento altruista predicen que los individuos ayudarán a, o cooperarán con, parientes próximos antes que con parientes lejanos o con individuos no emparentados porque el hacerlo así les confiere una ventaja evolutiva. Cuanto más estrechamente emparentados se hallan entre sí dos individuos, más genes poseen en común. Un altruista ayudará a sus parientes, aun en el caso de que tal comportamiento resulte arriesgado para el individuo, porque al hacerlo aumenta la probabilidad de que genes idénticos a los suyos propios se transmitan a las generaciones futuras.

La expresión que Hamilton aplica al éxito reproductor que un organismo comparte cuando un pariente genético sobrevive y se reproduce es "eficacia inclusiva". Si los parientes viven cerca (quizá porque la dispersión a partir del lugar de nacimiento o de eclosión es baja), el reconocimiento específico de parentesco puede no ser necesario para que actúe lo que en realidad constituye un comportamiento que prima el parentesco. Sin embargo, si las interacciones con no parientes son también probables, la capacidad de reconocer a los parientes evitaría errar en el comportamiento de ayuda, o bien asegurar que el esfuerzo cooperativo se ejerza en beneficio del individuo adecuado, es decir, de un pariente cercano. En general, los individuos que no dirigen adecuadamente sus actos altruistas dejarán menos copias de sus genes a generaciones futuras que los animales capaces de dirigir sus actos altruistas a parientes. Por tanto, la selección natural debe favorecer la evolución del reconocimiento del parentesco junto con el altruismo.

Parece que existen tres mecanismos básicos de comportamiento que permiten a un individuo reconocer a sus parientes. En primer lugar, si los parientes van a encontrarse predeciblemente juntos en circunstancias sociales, el reconocimiento puede efectuarse a través del mecanismo de aprendizaje social, también denominado trato o familiaridad. Es decir, los individuos del mismo grupo familiar aprenden a reconocerse unos a otros en las primeras fases de la vida. Un segundo mecanismo, denominado comparación de fenotipos, se produce si un individuo aprende y recuerda una característica específica de sí mismo o de sus parientes. Dicha característica puede ser un olor, el color de un plumaje o alguna marca. El individuo puede luego identificar a otros como parientes o no parientes en razón de las similitudes y diferencias entre la característica que recuerda y la de un individuo no familiar. La comparación de fenotipos es fundamentalmente distinta del reconocimiento basado en la familiaridad, por-

que permite a un individuo reconocer a animales no familiares.

El tercer mecanismo, que depende de "genes de reconocimiento" específicos, faculta al individuo para distinguir a los que no pertenecen a su rango familiar. Este hipotético mecanismo de reconocimiento de parentesco, sin embargo, es puramente genético; aquí no interviene el aprendizaje. Ciertos genes de reconocimiento (o, más específicamente, alelos de reconocimiento, formas alternativas de genes) se expresan como un carácter fenotípico, tal como un olor. Los individuos que portan copias de tal alelo reconocen, y con ello tienden a favorecer, a otros individuos portadores del mismo alelo. Resulta importante recordar que cualquiera de esos mecanismos de reconocimiento de parentesco puede operar por separado o en conjunción con alguno de los demás.

Emprendimos el estudio del comportamiento de reconocimiento de parentesco en nuestro laboratorio de la Universidad estatal de Oregón hace varios años, en buena parte debido a que disponíamos de un sujeto adecuado: los renacuajos de *Rana cascadae* parecían ser idóneos para una investigación de ese tipo. En particular nos sorprendieron dos aspectos de la historia natural de la especie. El primero de ellos era que los renacuajos de la rana de las Cascade se mostraban insólitamente sociales. No se sabe que la mayoría de renacuajos de ranas formen agregaciones o cardúmenes; los de la rana de las Cascade sí constituyen agregaciones cohesivas de menos de 100 individuos. Por otra parte, puesto que uno de nosotros (O'Hara) había estudiado la historia natural de esos renacuajos, sabíamos que no se dispersaban a gran distancia del lugar de eclosión del huevo. Ello sugería que debían ser numerosas las oportunidades de que los parientes interactuaran entre sí; quizá las agregaciones que observábamos estuvieran compuestas principalmente de parientes. Especulamos entonces con la posibilidad de que el reconocimiento del



1. RENACUAJOS de la especie *Rana cascadae*; forman cardúmenes pequeños y cohesivos en un estanque de la Cordillera de las Cascade, Oregón. Aparentemente, esos girinos distinguen los renacuajos hermanos de los que no lo son, y prefieren asociarse con aquéllos. Tal preferencia, que perdura en un individuo a lo largo de su metamorfosis en rana, significa que, probablemente, los cardúmenes de estos renacuajos estén constituidos principalmente por parientes.

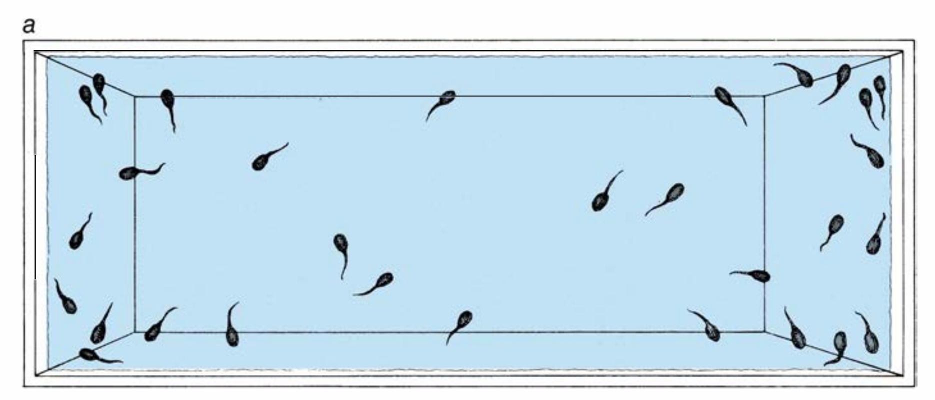
parentesco confiriera a los renacuajos de la rana de las Cascade la capacidad de formar y mantener la cohesión de los grupos.

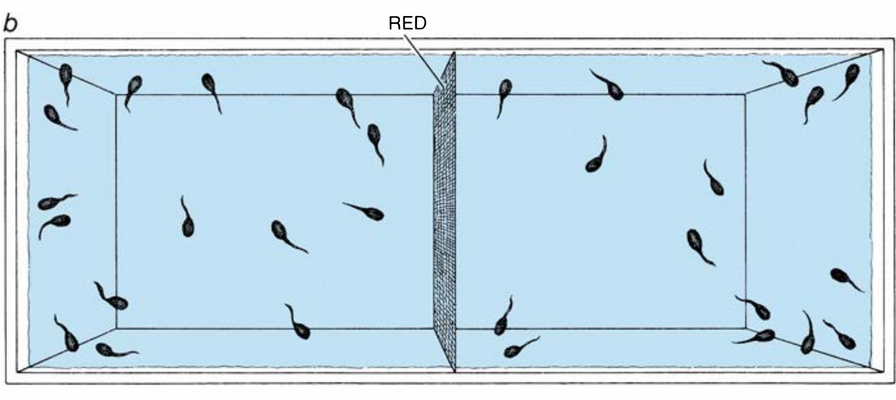
Para averiguar la naturaleza y el mecanismo del reconocimiento de parentesco precisábamos diseñar un protocolo experimental que permitiera a los renacuajos elegir entre parientes y no parientes que, en ambos casos, les resultaran conocidos y desconocidos. Teníamos presentes tres cuestiones básicas que los etólogos suelen plantearse cuando abordan cualquier estudio de comportamiento: ¿cómo se desarrolla el comportamiento? ¿cuál es la base sensorial del comportamiento? ¿cuál es su valor adaptativo?

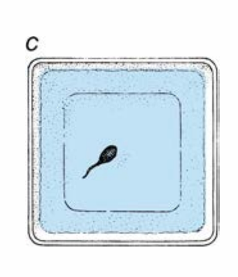
Empezamos por recolectar puestas, masas de huevos, de ranas de las Cascade depositadas por distintas hembras y fecundadas por machos diferentes, y las llevamos al laboratorio. (Una puesta de rana de las Cascade contiene entre 400 y 800 huevos; todos los renacuajos nacidos de una misma puesta son hermanos.) También recolectamos parejas de ranas en cópula y dejamos que la oviposición y la fecundación tuvieran lugar en el laboratorio. Luego sometimos a los embriones en desarrollo a uno de los cuatro regímenes de cría previstos antes de comprobar en los renacuajos su capacidad para identificar a sus parientes.

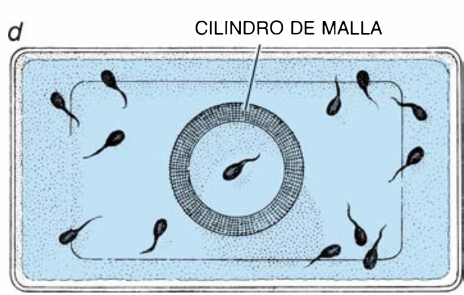
En el primer régimen se criaba a los individuos en acuarios en los que sólo había miembros de su propia puesta, de modo que se hallaban expuestos únicamente a sus hermanos. En el segundo régimen criamos un número igual de renacuajos de dos puestas distintas a uno y otro lado de un acuario dividido por una pantalla central de malla. El agua fluía libremente entre los dos grupos, permitiendo a los miembros de ambos el intercambio de señales químicas y visuales. Llamamos a este régimen de cría mixta, porque se criaban casi juntos individuos de dos grupos de parentesco distinto.

En el tercer régimen extraíamos de una puesta huevos acabados de fecundar y encerrábamos cada huevo en un recipiente opaco, de modo que el renacuajo se criara en aislamiento total de los demás girinos. En el cuarto régimen de cría encerrábamos un único huevo recién fecundado en un cilindro de malla situado en el centro de un acuario de cría. Luego colocábamos embriones en desarrollo de otra puesta en el agua que rodeaba el embrión de prueba. De este modo, los individuos criados según este régimen se hallaban expuestos química y visualmente sólo a renacuajos no emparentados antes de sufrir la prueba. En resumen, los cuatro regímenes nos permitían trabajar con cuatro conjuntos distintos de renacuajos: los que se criaban sólo con hermanos completos, los criados a la vez con hermanos y no hermanos, los criados en aislamiento total y los criados sólo con no hermanos.









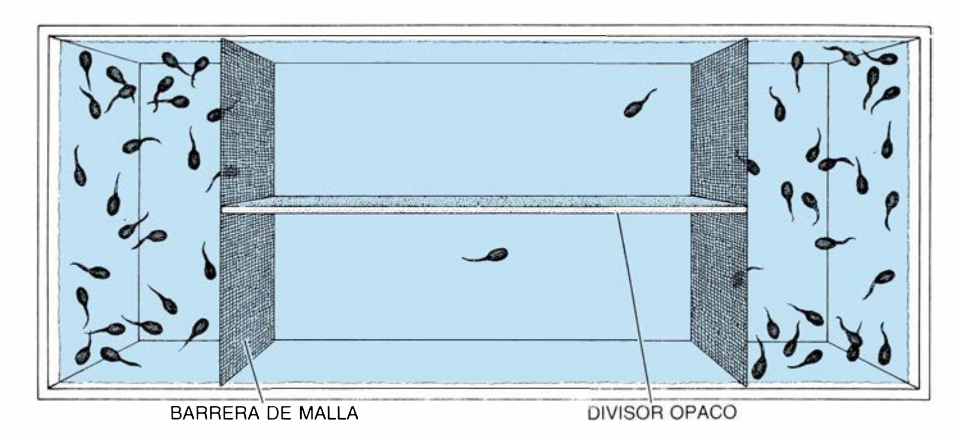
2. CUATRO REGIMENES DE CRIA exponen a los renacuajos en desarrollo a distintos ambientes antes de someterlos a ensayos de su capacidad de reconocer parientes. En un caso, los embriones tomados de una única masa de huevos se crían juntos en un acuario, de manera que los renacuajos están expuestos sólo a hermanos (*a*). En un régimen de "cría mixta" (*b*), los embriones de dos masas de huevos distintas se crían a ambos lados de una red de malla. Los miembros de los dos grupos pueden intercambiar señales visuales y químicas, con lo que se hallan expuestos a la vez a hermanos y no hermanos. En un tercer régimen, un óvulo fecundado se coloca en una placa opaca (*c*), de modo que el renacuajo se críe en aislamiento. En el cuarto régimen se dispone un solo óvulo fecundado en el interior de un cilindro de malla (*d*) con 12 embriones de una masa ovígera distinta fuera del cilindro: el renacuajo está expuesto únicamente a no hermanos.

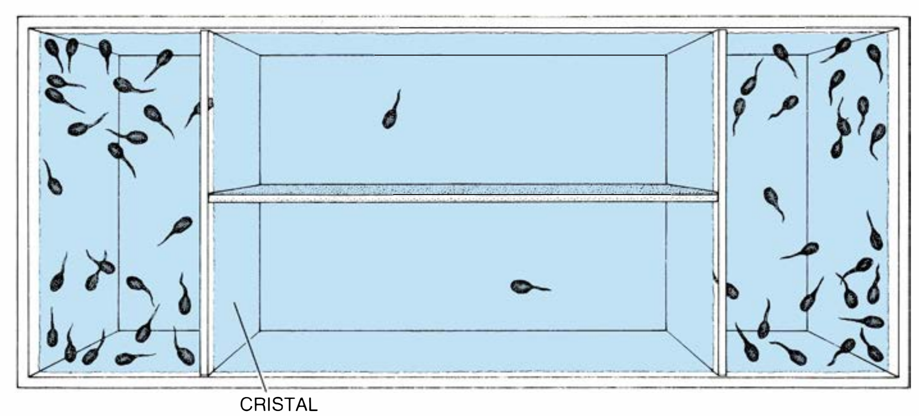
Para analizar el efecto de los distintos regímenes de cría sobre el reconocimiento del parentesco en los renacuajos sometimos a prueba los cuatro conjuntos de girinos permitiéndoles que eligieran asociarse con un grupo de renacuajos de los dos que se les presentaban como estímulo. Los animales de estímulo diferían en su parentesco y familiaridad en relación con los individuos sometidos a prueba. Los ensayos se realizaron en un depósito rectangular dividido en dos mitades por una barrera central, opaca y estanca. Se sometía a ensayo simultáneamente (pero de forma independiente) a dos renacuajos, uno a cada lado de la barrera. Los extremos del depósito estaban divididos mediante una red de plástico; formábanse así dos pequeñas cámaras donde nadaban los renacuajos de estímulo (por lo general unos 25). Los renacuajos de prueba podían ver a los de estímulo; cabía el intercambio de señales químicas, pero no el contacto táctil.

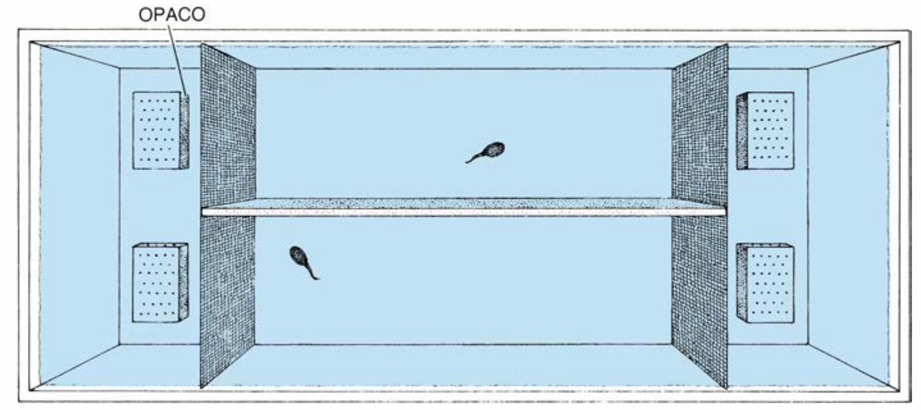
En una serie de experimentos repetidos registramos el tiempo que cada individuo de prueba pasaba en la parte del depósito más cercana a un deter-

minado grupo estímulo. Se comparaba ese tiempo con el que podía esperarse si el movimiento fuera totalmente al azar (50 por ciento del total del tiempo de la prueba). Como medida adicional de preferencia, también se registró el número de girinos que pasaban una mayor parte de su tiempo cerca de un extremo del depósito de prueba que del otro. Pruebas de control pertinentes no revelaron ningún sesgo en nuestros procedimientos ni en nuestros aparatos.

La primera serie de experimentos estableció ya el hecho básico: los renacuajos de la rana de las Cascade distinguen entre hermanos y no hermanos. Alrededor del 80 por ciento de los renacuajos criados únicamente con hermanos completos pasaron más tiempo (una cantidad adicional estadísticamente significativa) cerca de los hermanos que conocían que de los no hermanos que no conocían. Tanto los girinos sometidos a prueba en una etapa temprana (de 11 a 19 días después de la eclosión) como los ensayados en una etapa tardía (de 34 a 40 días después de la eclosión) del desarrollo exhibieron esa preferencia.







3. PRUEBAS DE PREFERENCIA DE LOS RENACUAJOS; se realizan en un acuario de 1,2 metros de longitud. En la prueba convencional (*arriba*) el acuario está dividido por una barrera central opaca de modo que puedan someterse a prueba dos renacuajos simultáneamente, pero de manera independiente. Con piezas divisorias de malla de plástico se crean dos cámaras terminales, cada una de las cuales está ocupada por 25 renacuajos de "estímulo", que pueden ser hermanos o no hermanos de un animal de prueba. El individuo que se somete a prueba puede elegir entre nadar cerca de uno u otro de los dos grupos de renacuajos estímulo. Se anota el tiempo que pasa cerca de cada grupo. La mayoría de los renacuajos de los cuatro tipos de regímenes de cría eligieron pasar más tiempo nadando cerca de sus hermanos que cerca de sus no hermanos. La base sensorial del reconocimiento de parentesco se determina modificando de dos maneras el depósito habitual de las pruebas. Mediante láminas estancas de vidrio, que sustituyen a las divisiones terminales de red (*centro*) se permite a los renacuajos la observación de los dos grupos de estímulo, pero se evita el intercambio de señales químicas. En esas condiciones no se advierten preferencias por los hermanos. Cuando los grupos de estímulo se encierran en cajas cuyo lado dirigido hacia los animales de prueba es opaco, pero con los demás lados y la parte superior perforados (*abajo*), los renacuajos de prueba no ven a los grupos de estímulo, pero sí pueden percibir sus señales químicas. En estas condiciones los renacuajos de prueba mostraron una preferencia por sus hermanos, prueba de que en el reconocimiento del parentesco intervienen señales químicas.

El siguiente paso era intentar determinar la influencia del trato con otros renacuajos en el comportamiento de reconocimiento del parentesco. Ello aportaría alguna luz sobre el desarrollo de tal comportamiento en la especie y, quizá, nos ofreciera algún atisbo del mecanismo que controlaba el comportamiento. Lo que hicimos fue analizar tres grupos de renacuajos: los de regímenes de cría mixta, los criados sólo con no hermanos y los criados en aislamiento total. Después de criarlos en uno de esos regímenes durante una media de cuatro semanas, a los renacuajos de prueba se les dio a elegir entre asociarse con un grupo de hermanos completos no conocidos o bien hacerlo con un grupo de no hermanos no conocidos.

Los resultados de esos experimentos nos mostraron que, al igual que los girinos criados sólo con hermanos completos, los renacuajos criados en un régimen mixto pasaron asimismo más tiempo cerca de sus hermanos que cerca de sus no hermanos. Lo que resultó particularmente significativo en esta serie de experimentos era que los renacuajos de prueba pudieran distinguir entre hermanos desconocidos y no hermanos desconocidos. Las pruebas de renacuajos criados sólo con no hermanos dieron el mismo resultado: preferían asociarse con hermanos no conocidos que hacerlo con no hermanos también extraños. Parece, por tanto, que la exposición a renacuajos no emparentados durante el desarrollo no alteraba la preferencia por la asociación con hermanos. Es más, el trato precoz con los hermanos no constituye prerrequisito para identificarlos más avanzada la vida.

Finalmente, quedaban los renacuajos criados en aislamiento total, que nunca habían tenido trato con, y ni siquiera habían visto a, otros renacuajos que nadaran libremente antes de experimentar la prueba. También ellos preferían pasar la mayor parte del tiempo nadando cerca de sus hermanos. Aparentemente, no se requería

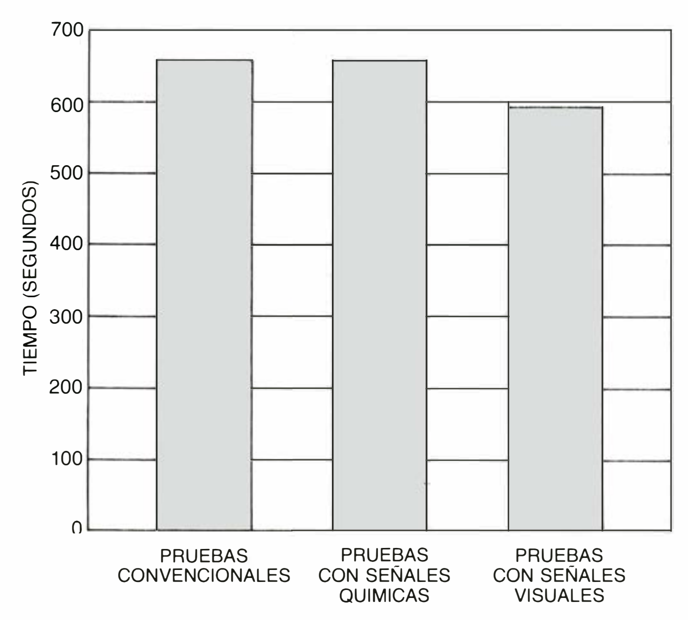
experiencia alguna con ningún otro individuo para desarrollar el comportamiento del reconocimiento del parentesco. Puesto que los renacuajos podían identificar a hermanos con los que no habían estado en contacto desde que, de embriones, se hallaban juntos en la masa ovígera, concluimos que el trato previo no podía constituir el mecanismo principal de reconocimiento de parentesco en esa especie. Debían intervenir la comparación de fenotipos, genes de reconocimiento o ambos mecanismos.

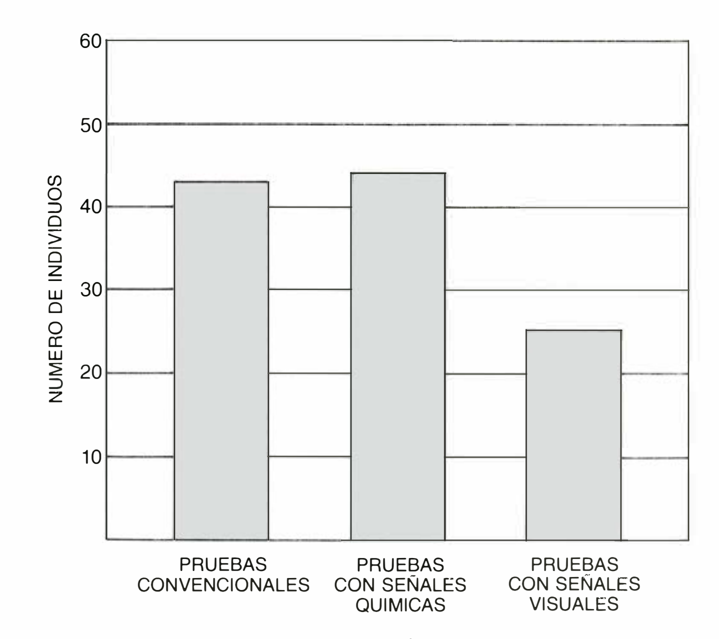
El grado de sensibilidad que exhiba un sistema de reconocimiento de parentesco puede ayudar a identificar el mecanismo que esté operando. Un sistema muy sensible bien pudiera sugerir un componente genético. ¿Cuán sensible es el sistema de reconocimiento del parentesco de *R. cascadae*? Para responder a esa pregunta decidimos comprobar si los renacuajos podían distinguir a sus hermanos genuinos de hermanastros, y a éstos de los no hermanos. Produjimos hermanastros paternos fecundando los huevos de dos hembras con el esperma de un mismo macho, y hermanastros maternos fecundando la mitad de la puesta de una hembra con esperma de un macho y la otra mitad con esperma de otro.

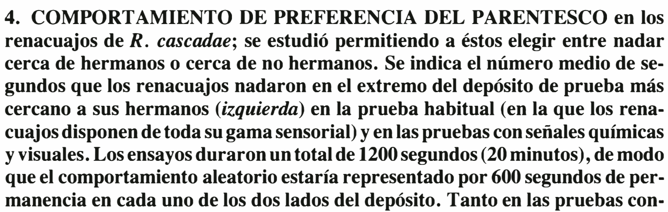
En una serie de experimentos similares a las pruebas convencionales ya descritas advertimos que los distintos renacuajos preferían asociarse con hermanos genuinos en lugar de hacerlo con hermanastros, ya fueran éstos maternos o paternos. Los hermanastros maternos eran preferidos a los paternos o a los no hermanos, y los hermanastros paternos eran preferidos a los no hermanos. Aparentemente, las señales maternas y paternas bastaban por sí solas para el reconocimiento del parentesco, y los renacuajos de la rana de las Cascade distinguían entre individuos de varios grados de parentesco; sin duda se trata de un sistema de reconocimiento del parentesco notablemente sensible. El hecho de que los girinos sometidos a prueba prefirieran los hermanastros maternos a los paternos sugiere que las señales maternas ejercen mayor influencia sobre el reconocimiento. Quizá la razón estribe en que la madre contribuye más al embrión en desarrollo (algunos factores citoplasmáticos de los óvulos, por ejemplo) que el padre, cuya contribución se reduce, principalmente, a la información genética. Pero el hecho de que los hermanastros paternos se distinguieran de los no hermanos sugiere que al menos parte del reconocimiento de parentesco en esta especie se halla relacionada con un factor genético.

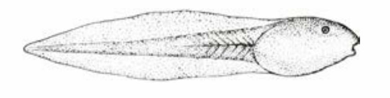
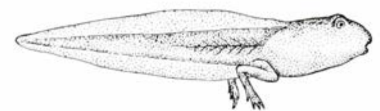
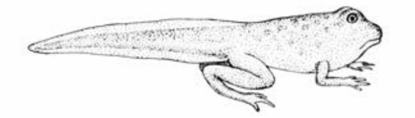
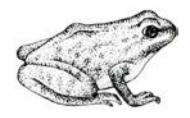
¿Qué valor puede tener para los renacuajos de la rana de las Cascade un sistema de reconocimiento de parentesco, por no decir un sistema de tal sensibilidad? La posibilidad más evidente es que el reconocimiento del parentesco constituya la base de la capacidad de estos girinos para formar cardúmenes pequeños y densos. Algunas de las ventajas que se derivan de vivir en cardúmenes en lugar de hacerlo solos son una mayor capacidad de encontrar y compartir un recurso alimentario limitado, evitar ser descubiertos por los depredadores y detectar a un depredador que se acerca y huir del mismo. Indicios recientes obtenidos en nuestro laboratorio muestran, por ejemplo, que los renacuajos que sufren el ataque de insectos depredadores liberan sustancias químicas que inducen a otros componentes del grupo a huir. Creemos que la función primordial del reconocimiento del parentesco en los renacuajos de la rana de las Cascade es promover la cohesión de los individuos emparentados, posiblemente con el fin de facilitar la alimentación, pero más probablemente para evitar a los depredadores. Sin duda los individuos podrían obtener los beneficios del grupo que se han descrito si estuvieran en un grupo de individuos no emparentados. Sin embargo, al ayudar o al avisar a parientes auxilian a aquellos con los que comparten genes, y con ello aumentan su propia eficacia inclusiva.

En las pruebas que hemos descrito

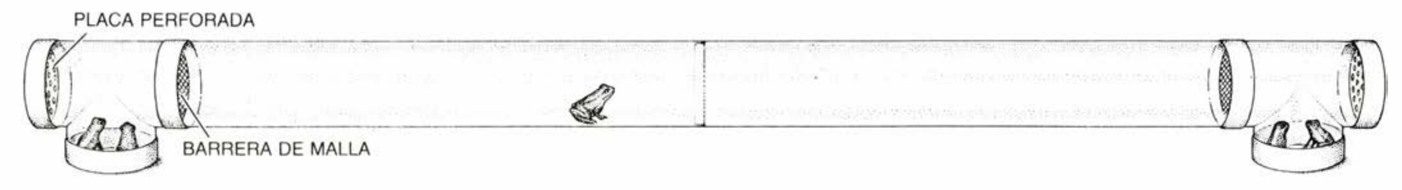





4. COMPORTAMIENTO DE PREFERENCIA DEL PARENTESCO en los renacuajos de *R. cascadae*; se estudió permitiendo a éstos elegir entre nadar cerca de hermanos o cerca de no hermanos. Se indica el número medio de segundos que los renacuajos nadaron en el extremo del depósito de prueba más cercano a sus hermanos (*izquierda*) en la prueba habitual (en la que los renacuajos disponen de toda su gama sensorial) y en las pruebas con señales químicas y visuales. Los ensayos duraron un total de 1200 segundos (20 minutos), de modo que el comportamiento aleatorio estaría representado por 600 segundos de permanencia en cada uno de los dos lados del depósito. Tanto en las pruebas convencionales como en las que permitían la difusión de señales químicas los renacuajos pasaron una media de 660 segundos en el extremo del depósito cercano a sus parientes; cuando los renacuajos debían valerse sólo de señales visuales, el tiempo que pasaron cerca de sus parientes se redujo al nivel de azar. En cada prueba se observó un total de 60 individuos; el número de girinos que se mantuvo más tiempo cerca de los parientes que de los no parientes constituye otra medida de preferencia (*derecha*). En las pruebas convencionales y de señales químicas, alrededor del 75 por ciento de los individuos sometidos a ensayo pasó una mayor porción de su tiempo cerca de sus hermanos. (Dibujos de Tom Prentiss.)

5. DESARROLLO de renacuajos a ranas; se produce a lo largo de un período que va de seis a más de ocho semanas. Se muestran aquí cuatro estadios representativos de ese proceso, entresacados de un continuo de 26 estadios. (La edad a la que los renacuajos alcanzan un estadio determinado es extremadamente variable.) *R. cascadae* exhibe comportamiento de reconocimiento de parentesco en cada uno de los cuatro estadios del desarrollo, incluido el de ranita (*derecha*).



6. CAMARA DE PRUEBA diseñada para determinar si el reconocimiento del parentesco persiste después de atravesar la metamorfosis. La cámara situada en un extremo del tubo de plástico transparente contiene hermanos de la rana de prueba colocada en el tubo; la cámara del otro extremo contiene individuos no emparentados. La preferencia de parentesco viene determinada por el tiempo que la rana de ensayo pasa cerca del extremo del tubo que contiene a sus hermanos, comparado con el tiempo que pasa cerca de sus no hermanos. *R. cascadae* mostró esa preferencia incluso después de sufrir la metamorfosis.

hasta ahora los renacuajos disponían de su dotación sensorial completa. Para identificar la base sensorial de su comportamiento de reconocimiento del parentesco emprendimos una nueva serie de experimentos. En primer lugar investigamos la posibilidad de comunicación sonora. Escuchamos a renacuajos aislados con un hidrófono y un osciloscopio, desde frecuencias de 10 hertz (ciclos por segundo) que, según se sabe, se encuentran en el límite inferior del espectro auditivo de los animales, hasta los 100.000 hertz. Los renacuajos no emitieron ningún sonido a las frecuencias ensayadas.

Modificando los procedimientos de nuestras pruebas convencionales intentamos ver luego si los renacuajos se comunicaban mediante señales visuales o químicas. En una prueba pusimos animales de estímulo detrás de una lámina de cristal estanca en lugar de una malla de plástico, de modo que los renacuajos de estímulo y los de prueba pudieran verse pero no comunicarse por medios químicos. En otro experimento pusimos renacuajos de estímulo en cámaras a las que se les habían acoplado paneles frontales opacos dirigidos hacia los animales de prueba, pero con los lados y la parte superior perforados. Las cámaras se colocaron detrás de la malla de plástico de los compartimentos extremos del depósito habitual. Este diseño permitía que las sustancias químicas fluyeran entre los animales de estímulo y los de prueba, pero impedía cualquier contacto visual. Los animales de prueba no lograron identificar a sus parientes sólo con la vista, mientras que se registraba reconocimiento del parentesco cuando sólo se podían captar señales químicas. Resultaba evidente que la quimiorrecepción mediaba el reconocimiento del parentesco en esos renacuajos. Debían elaborar algún tipo de señal química única para su grupo de parentesco, que podían oler, gustar o sentir para distinguir a los parientes de los que no lo eran.

Nos preguntábamos si el comportamiento de reconocimiento del parentesco sobreviviría a los drásticos cambios anatómicos, fisiológicos, ecológicos y de compartamiento que acompañan a la metamorfosis, momento en el cual el renacuajo acuático, principalmente omnívoro y que respira por branquias, se transforma en una rana anfibia, carnívora y de respiración pulmonar. Para dedicarnos a esa cuestión emprendimos la formidable tarea de cuidar de cientos de ranas que acababan de sufrir metamorfosis. Luego sometimos a ensayo ranitas de cuatro a doce días después de la metamorfosis, a las que repetíamos la prueba de 39 a 47 días después de la metamorfosis para contrastar su capacidad de identificar a los parientes.

Efectuamos el experimento de modo comparable a nuestras pruebas habituales de preferencia para los renacuajos, pero en un aparato en el que pudieran acomodarse las ranas. Colocamos ranitas individuales en un tubo de plástico transparente y húmedo, dividido por pantallas cerca de ambos extremos, para crear dos compartimentos de estímulo y un compartimento de prueba. Uno de los compartimentos de estímulo contenía hermanos de la ranita sometida a prueba y, el otro, contenía no hermanos. Registrábamos cuánto tiempo pasaban las ranitas en la parte del tubo situada cerca de los hermanos en comparación con el que pasaban cerca de los no hermanos. Los resultados sugerían que, aparentemente, las ranitas habían retenido la capacidad de identificar a sus parientes a pesar de los drásticos cambios anatómicos y fisiológicos sufridos.

¿Qué ventaja confiere el reconocimiento del parentesco a las ranas de las Cascade después de la metamorfosis, siendo así que no se conoce que, de adultas, formen agregaciones? Quizá la capacidad de reconocer el parentesco no confiera ventaja selectiva alguna a las ranas adultas y se retenga después de la metamorfosis simplemente porque no existe una presión selectiva determinada en contra de tal conservación. También es posible que los adultos dependan de la capacidad de reconocer el parentesco, ya en el comportamiento reproductor (para evitar aparearse con parientes cercanos), ya en la organización social, para encontrar su estanque materno después de haber sido desplazados.

Los experimentos de laboratorio sólo pueden aproximarse a las complejas condiciones sociales y ecológicas que los animales encuentran en la naturaleza, y simplificarlas. Por esa razón, durante tres veranos consecutivos realizamos experimentos en estanques y lagos naturales habitados por renacuajos de rana de las Cascade. Obtuvimos renacuajos para los experimentos de campo recolectando masas de huevos de charcas de cría naturales y criando a los individuos en el laboratorio, ya fuera sólo con hermanos o en regímenes de cría mixta. Marcamos los renacuajos de dos grupos de parentesco con colores diferentes sumergién-

dolos en un tinte inocuo rojo o azul. Luego entremezclamos a miembros de los dos grupos y los soltamos en estanques naturales de la cordillera Cascade. Consideramos la posibilidad de que los renacuajos pudieran formar grupos basados en su nuevo color y no en el parentesco. Por tanto, como control, dividimos algunos grupos de parentesco únicos, teñimos la mitad de los miembros de cada grupo de rojo y la otra mitad de azul y los soltamos en estanques de seguimiento.

No resultó tarea fácil acercarse a las agregaciones de renacuajos y capturarlas. Cuando detectaban que nos movíamos hacia ellos se dispersaban rápidamente. Con todo y con ello, logramos determinar que los renacuajos rojos y azules del mismo grupo de parentesco se agreban al azar en los estanques de control: el color del tinte no ejercía efecto alguno en las 103 agregaciones que muestreamos. En cambio, la distribución de los renacuajos rojos y azules de distintos grupos de parentesco no se mostraba en absoluto aleatoria: las 353 agregaciones que muestreamos en los estanques experimentales estaban dominadas por uno de los dos colores. Los resultados de esos experimentos de campo nos llevaron a considerar que, en la naturaleza, los renacuajos de la rana de las Cascade pueden identificar a sus parientes y prefieren asociarse con ellos, igual que hacen en el laboratorio.

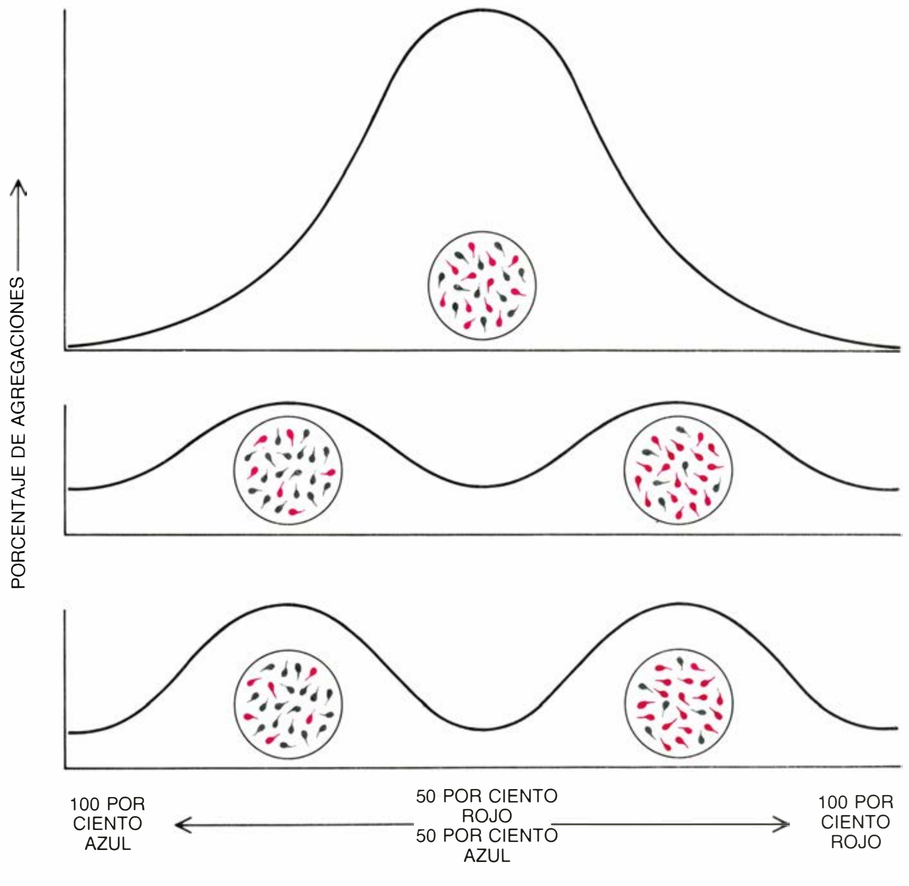
Habíamos especulado en un principio que determinados aspectos del comportamiento observado en los renacuajos de la rana de las Cascade podrían estar conectados con un sistema activo de reconocimiento de parentesco. Demostrado que ello era cierto, centramos nuestra atención en otras especies de anuros que exhibieran características de comportamiento distintas.

Las ranas patirrojas (*Rana aurora*) están estrechamente emparentadas con la rana de las Cascade. Sin embargo, cuando las sometimos a una serie convencional de pruebas de preferencia, los resultados fueron muy distintos. Los renacuajos de rana patirroja sólo distinguían a sus parientes al principio de su estadio de natación libre, y sólo si se habían criado con hermanos genuinos; perdían su capacidad de reconocer el parentesco a medida que se desarrollaban. Los renacuajos de sapo occidental (*Bufo boreas*) pueden reconocer a los parientes durante todo el estadio de renacuajo, pero sólo si no se les ha expuesto a la presencia de individuos no emparentados. Si han tenido trato con no parientes, rápidamente pierden la capacidad de identificar a los renacuajos emparentados.

Nuestros resultados con sapos occidentales son parecidos a los que cita Bruce Waldman, de la Universidad de Cornell, quien investigó renacuajos de un anuro estrechamente emparentado, el sapo americano (*Bufo americanus*). En experimentos de laboratorio encontró que los girinos de sapo americano no suelen distinguir entre parientes y no parientes si crecen en un régimen de cría mixta. Quizás en ambas especies de sapos, y posiblemente en la rana patirroja, el trato influya sobre la identificación de los parientes.

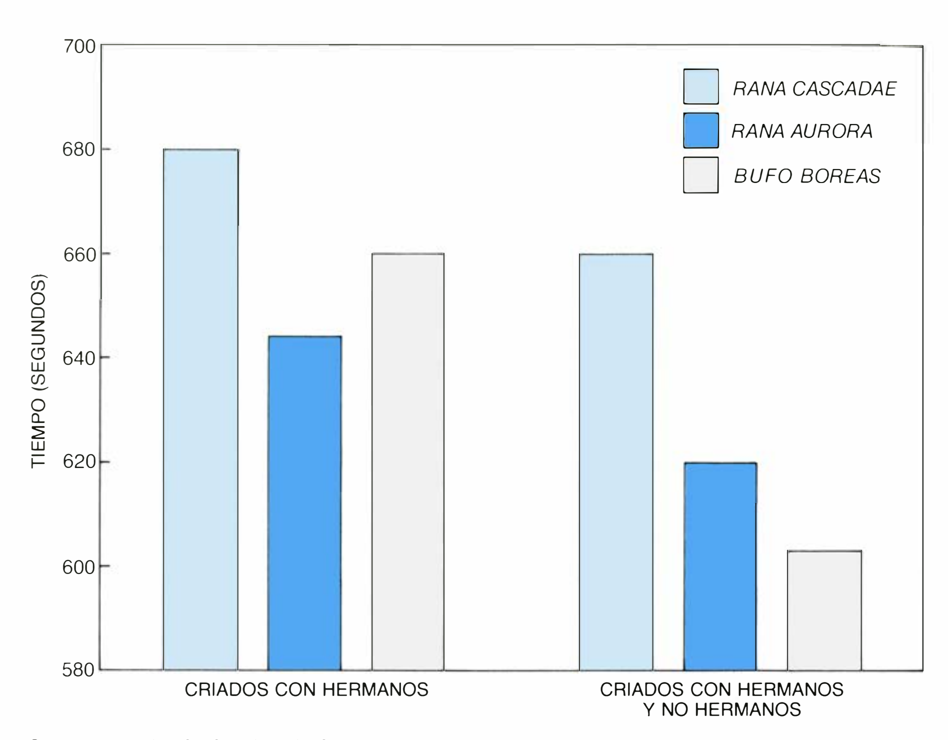
No nos sorprendió ver que los renacuajos de la rana patirroja y de sapo occidental no presentaban una capacidad bien desarrollada de reconocer a parientes. Los renacuajos de ambas especies se dispersan rápidamente de sus lugares de eclosión. Además, los renacuajos de rana patirroja no parecen formar agregaciones, y los renacuajos de sapo occidental suelen encontrarse en enormes cardúmenes (compuestos por hasta un millón de renacuajos) formados por individuos de cientos de puestas diferentes. Probablemente los renacuajos de esas especies no hayan disfrutado de suficientes oportunidades de interacción con parientes durante el desarrollo para producir, por evolución, un sistema de reconocimiento de parentesco sensible que les permita formar grupos cohesivos.

Cuando se revisan los resultados de estudios de reconocimiento de parentesco en varias especies animales aparecen ciertas pautas. Por ejemplo, las formas acuáticas, como peces y renacuajos, se sirven de señales químicas



7. PREFERENCIAS EN LA FORMACION DE CARDUMENES en *R. cascadae*; se estudiaron en un ambiente natural en lugar de hacerlo en el laboratorio. Al efecto se marcó a los animales con un colorante, azul o rojo, soltándolos en estanques y determinando la composición de colores de las agregaciones que formaban. Como control, la mitad de los miembros de otras puestas se tiñeron de azul y la otra mitad de rojo. Los hermanos se soltaban en estanques y se contaba el número de renacuajos de cada color en los bancos que formaban. Cuando se dispusieron sobre un gráfico los resultados de una serie de recuentos de control, dieron una curva en forma de campana (*arriba*): la mayoría de los cardúmenes eran aproximadamente la mitad azules y la mitad rojos, lo que indicaba que el color por sí mismo no influía sobre la agregación. En las pruebas reales, los miembros de una puesta se teñían de azul y, los de otra, de rojo. Al representar los resultados de varias pruebas, la composición de color de los bancos se acercaba a una distribución "bimodal": tanto si los hermanos se habían criado aparte (*centro*) como juntos (*abajo*), la mayoría de los bancos eran predominantemente azules o rojos. Esto es, la mayor parte de las agregaciones estaban constituidas por parientes.

transmitidas por el agua; las aves, de señales genéticas fijas, como la coloración del plumaje, o de señales variables, vocalizaciones por ejemplo. Las señales olfativas constituyen la base de la identificación del parentesco en la mayoría de especies de insectos y mamíferos. Hoy resulta evidente que el más común de los tres mecanismos para identificar el parentesco es el trato habitual, que actúa de manera eficaz cuando se da una gran probabilidad de que los individuos con los que un determinado animal interactúa sean sus parientes. El reconocimiento del parentesco está influido por el trato en los sapos occidentales que examinamos; también desempeña éste algún papel en la capacidad de reconocimiento de la mayoría de aves y de pequeños mamíferos que han sido estudiados. El trato habitual probablemente constituye un importante medio para evitar la endogamia en muchas especies.



8. DIFERENCIAS ESPECIFICAS en el comportamiento de reconocimiento del parentesco que aparecen cuando a renacuajos de dos especies de ranas y de una especie de sapo se les somete a las pruebas convencionales de reconocimiento de parentesco. Las tres especies prefieren asociarse con parientes si se han criado sólo con hermanos; es decir, pasan más de los 600 segundos que corresponden al azar en el extremo del depósito más cercano a sus hermanos. (Ello es así para los estadios de desarrollo tempranos y tardíos de *R. cascadae* y del sapo *Bufo boreas*, pero sólo para los estadios larvarios tempranos de *R. aurora*.) En los renacuajos criados a la vez con hermanos y no hermanos, el tiempo que pasan con los hermanos cae al nivel del azar en *R. aurora* y *B. boreas*; la preferencia por los parientes sigue siendo significativa en *R. cascadae*.

Aunque estamos seguros de que el conocimiento mutuo no constituye parte esencial del mecanismo de reconocimiento del parentesco en los renacuajos de la rana de las Cascade, no podemos estarlo de si el mecanismo resulta de una comparación de fenotipos aprendida o bien deriva de genes de reconocimiento innatos. Con frecuencia se hace difícil distinguir entre ambos, aunque existen algunos casos muy claros de comparación de fenotipos. Por ejemplo, Gregory R. Buckle y Les Greenberg, de la Universidad de Kansas, demostraron que las abejas del sudor (*Lasioglossum zephyrum*), que guardan entradas de nido, distinguen a las abejas desconocidas basándose en la similitud fenotípica con individuos con los que se criaron. Las guardianas aprenden el olor de sus compañeras de nido y, de los individuos que no les resultan familiares, sólo dejan entrar los que huelen como dichas compañeras. Richard H. Porter, de la Universidad de Vanderbilt, ha demostrado que los ratones espinosos (*Acomys cahirinus*) que se "olorizan" artificialmente prefieren asociarse, de entre los individuos desconocidos, con aquellos a los que se les ha dado el mismo olor.

Resulta más difícil establecer los casos claros de mecanismo de reconocimiento de origen genético, pero estudios recientes de las preferencias de apareamiento en el ratón doméstico (*Mus musculus*) han aportado pruebas concordantes con un sistema de reconocimiento genético [véase "Reconocimiento quimiosensorial de la individualidad genética", por Gary K. Beauchamp, Kunio Yamazaki y Edward A. Boyse; INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, septiembre de 1985]. Los resultados muestran que los ratones pueden elegir entre parejas potenciales que difieren en un único *locus* genético del complejo mayor de histocompatibilidad (*H*-2), que especifica los antígenos responsables de la distinción entre lo propio y lo extraño. Los ratones macho prefieren aparearse con hembras cuyo tipo *H*-2 es distinto del suyo propio. La preferencia se basa en el olor, establecido genéticamente, asociado con determinados alelos *H*-2.

El sensible sistema de reconocimiento de parentesco de los renacuajos de la rana de las Cascade quizá se encuadre asimismo en un sistema de reconocimiento genético. Sin embargo, no puede descartarse la posibilidad de que un renacuajo de rana de las Cascade, incluso habiéndose criado en aislamiento total, pueda aprender su propio olor determinado genéticamente al percibirse a sí mismo. Luego podría casar los olores de dos grupos no conocidos y compararlos con su propio olor; el grupo que tuviera el olor más familiar se consideraría más estrechamente emparentado. Quizá resulte imposible determinar experimentalmente si lo que actúa en los renacuajos de las Cascade es la comparación de fenotipos o un sistema innato de reconocimiento genético; puede que ambos operen simultáneamente. De hecho, existe una propuesta en el sentido de que las diferencias entre los dos mecanismos son triviales. Ambos mecanismos permiten a un animal identificar a un pariente no conocido, de modo que las consecuencias evolutivas son las mismas.

Además de las implicaciones teóricas relacionadas con el altruismo familiar, el reconocimiento de parentesco puede proporcionar importantes beneficios prácticos. Conocer de qué modo los miembros de una determinada especie se reconocen unos a otros resulta fundamental en ganadería y en la propagación de determinadas especies amenazadas, en particular en aquéllas en las que el trato familiar con las parejas potenciales influye en el comportamiento de apareamiento. La conexión, recientemente demostrada, entre un sistema de reconocimiento de parentesco y los genes de histocompatibilidad sugiere un tipo de beneficio distinto: los estudios de comportamiento de reconocimiento de grupo pueden verter luz sobre los mecanismos del sistema inmunitario.

Juegos de ordenador

Telescopio informático que simula choques y aproximaciones estelares

A. K. Dewdney

En lo profundo del espacio, un cúmulo de estrellas ejecuta una danza cósmica al son de la gravedad. En el plazo de una vida humana, apenas se aprecia el desplazamiento de las estrellas; pero al tomar intervalos mayores, resultan describir una entrelazada confusión de órbitas. Ocasionalmente una estrella solitaria se encuentra con una vecina, en un *pas de deux* que la despide más profundamente aún en el espacio. Si la frecuencia de tales escapadas es más que ocasional, el cúmulo va gradualmente contrayéndose y su núcleo comienza a colapsarse.

Un potente telescopio puede revelar la estructura de algunos de los cúmulos de nuestra galaxia, pero no comprimir los años hasta convertirlos en segundos: sólo un ordenador puede. También cabe programar un ordenador para que actúe a modo de telescopio con el que observar hipotéticos racimos de estrellas. A velocidad cósmica, se observa el movimiento de los miembros de un racimo, que se muestra como una sucesión de instantáneas, dejando cada estrella tras de sí un rastro punteado que serpea a través del cúmulo [*véase la figura 1*].

¿Bastan las solas fuerzas gravitatorias para dar cuenta de la evolución que los astrónomos infieren de la observación de los cúmulos estelares? Los ordenadores colaboran en dar respuesta a esa cuestión y a otras similares. En mayo de 1984 se celebró en la Universidad de Princeton una conferencia de teóricos y especialistas en simulación para analizar la consistencia de los cúmulos estelares, tanto reales como hipotéticos. Se trataba del 113 Simposio de la Unión Astronómica Internacional; el simposio entero se dedicó a la dinámica de los cúmulos estelares.

Montar la coreografía de un ballet estelar resulta relativamente fácil. En principio, las interacciones en el seno de un cúmulo son de una simplicidad clásica: en cada una de las parejas de estrellas, la fuerza gravitatoria que ambas experimentan es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia que media entre ellas. La fuerza es también proporcional al producto de las dos masas estelares. No cuesta calcular la fórmula en cuestión: se multiplican las masas; después, el producto se multiplica por una constante de proporcionalidad, y el resultado se divide entre el cuadrado de la distancia que separa las estrellas. Es de presumir que la pauta de los movimientos en el seno del cúmulo estelar quede determinado por la acción de la resultante de todas esas fuerzas de atracción entre los pares de estrellas. Un programa, llamado CUMULO, calcula la suma de las fuerzas que experimenta cada estrella, y va trasladando la resultante desde su posición actual hasta otra nueva, cercana. Y así repetidamente, a lo largo de siglos de tiempo simulado.

La tarea de mecanografiar las coordenadas y velocidades de una pléyade de estrellas va acompañada, inevitablemente, de cierto tedio; pero una vez realizada, en la pantalla del monitor se nos ofrece un universo de salón, que podemos admirar desde una butaca. Las estrellas situadas en el centro del cúmulo siguen cursos erráticos o bamboleantes; las de la periferia son arrastradas hacia el exterior, para luego detenerse y deslizarse otra vez hacia dentro. Entre los acontecimientos más interesantes deben citarse los encuentros y los escapes.

Cuando dos estrellas se aproximan mucho, cada una imparte a la otra un tremendo impulso gravitatorio, para luego separarse a gran velocidad. Las fugas son, de ordinario, fruto de uno o más de esos acercamientos. Cuando una estrella se aleja rápidamente de su cúmulo, caben solamente dos posibilidades: que regrese o que no lo haga. Cada cuerpo astronómico tiene una velocidad de escape que es función de su masa y de la masa del cuerpo u objeto del cual escapa. Si una estrella que se mueve hacia el exterior del cúmulo alcanza esa velocidad, jamás retornará a él. Resulta verosímil que los más noveles, entre los entusiastas de la simulación de cúmulos, sean testigos de frecuentes escapes de las configuraciones que diseñen. En efecto, es experiencia inicial muy corriente ver desintegrarse la ansiada danza. Para comenzar, conviene practicar construyendo sistemas de dos o tres estrellas.

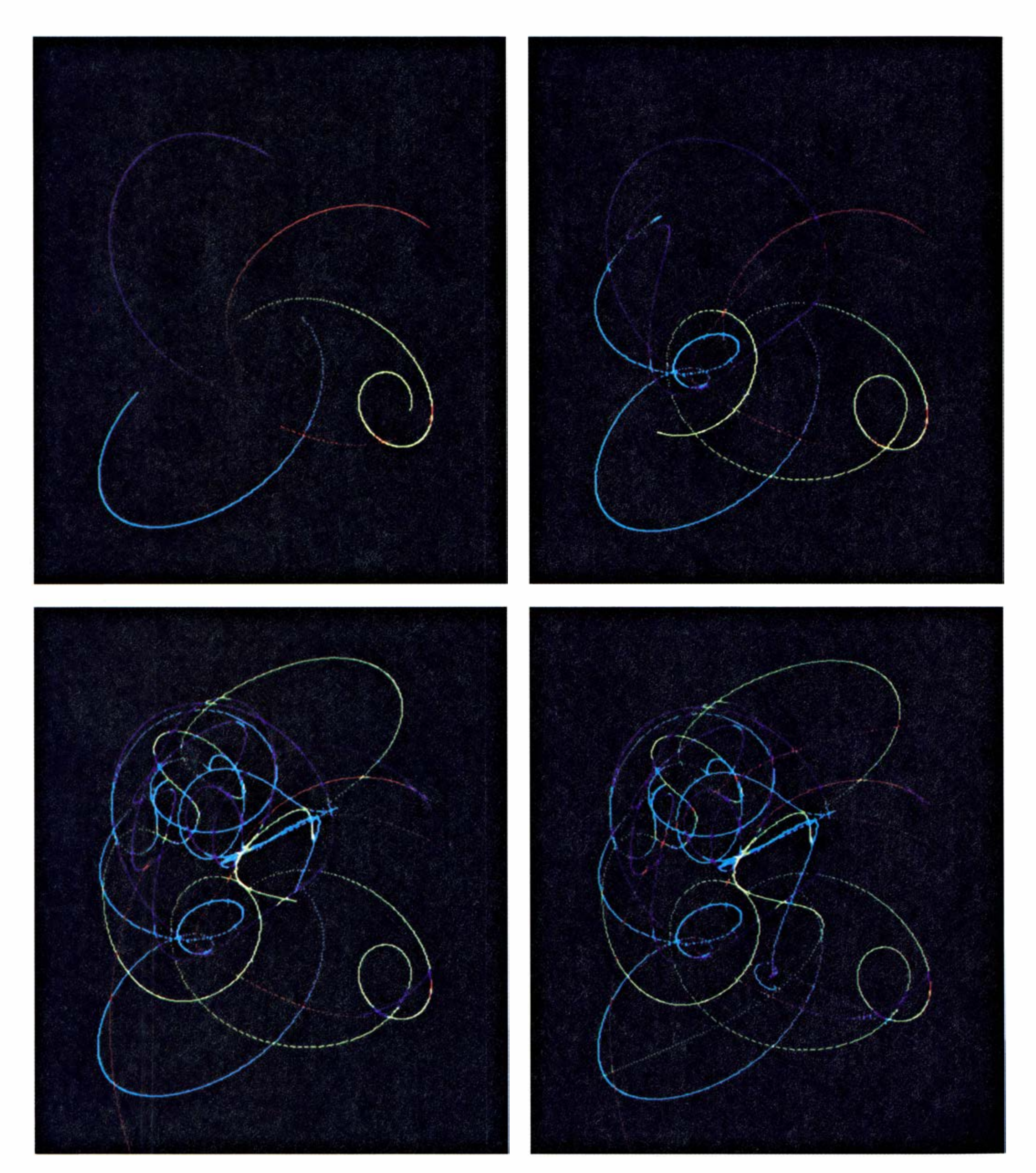
La estructura del programa CUMULO es sencilla. Consiste en un bucle de inicialización seguido de un bucle doble. En el interior del doble bucle se van actualizando las aceleraciones, velocidades y posiciones de cada estrella, que son resultado de la atracción de otras estrellas. Describiré aquí una versión particularmente simple del programa, en la cual el incremento de tiempo y la constante de atracción gravitatoria estén todas integradas en el programa. Sin embargo, a pesar de su simplicidad, esta versión de CUMULO parece capaz de simular casi por completo la gama de conductas cumulares. Se utilizan tres juegos de tablas. El primer juego lleva la cuenta de las aceleraciones que en cada momento experimentan las estrellas, en las direcciones de cada uno de los tres ejes de coordenadas. Las tablas se llaman *ax, ay* y *az*. Así pues, *ax*(*i*), *ay*(*i*) y *az*(*i*) indican las componentes de la aceleración de la *i*-ésima estrella en las direcciones de los ejes *x*, *y* y *z*. Sólo para estas tres tablas es innecesario inicializar su contenido al principio del programa. El segundo juego de tablas, *vx, vy* y *vz*, sirve para definir las velocidades: en *vx*(*i*), *vy*(*i*) y *vz*(*i*) se registran las componentes según los ejes *x, y* y *z* de la velocidad de la *i*-ésima estrella. El tercer juego de tablas recoge las posiciones: *x*(*i*), *y*(*i*) y *z*(*i*) son las tres coordenadas de posición de la *i*-ésima estrella del cúmulo. Los valores de partida de las tablas *x, y, z* y *vx, vy* y *vz* han de inicializarse en la cabecera del programa.

A continuación del segmento de inicialización viene el cuerpo principal del programa CUMULO. En este bucle doble se puede entrar indefinidamente, una y

otra vez; el programador puede también establecer las condiciones específicas que determinan el retorno a él. El bucle externo va examinando por turno cada una de las estrellas, y hace iguales a cero las componentes de la aceleración. Inmediatamente, el bucle interior calcula las fuerzas que ejercen sobre cada estrella sus compañeras del cúmulo.

Por ejemplo, supongamos que el índice de bucle externo sea i y que el índice del interno sea j. Lo primero que hace el bucle interior es averiguar si i es igual a j. Si lo es, el programa no invoca la rutina de cálculo de las fuerzas, pues las estrellas no se atraen a sí mismas. De todos modos, si se pretendiera calcular la fuerza también en este caso, se obligaría al ordenador a intentar dividir por cero. (Esa es la única situación en que los ordenadores me inspiran compasión.)

En el caso de que i y j sean distintos,



1. Cuatro estrellas representan un ballet cósmico durante algunos años y luego abandonan la escena

CUMULO se vale de las fórmulas de la geometría euclídea para hallar la distancia entre las estrellas, a saber: se elevan al cuadrado las diferencias; estos cuadrados se suman. El resultado, evidentemente, es el cuadrado de la distancia. A continuación, el bucle interior verifica si este número es 0. Si lo fuera, sería preciso activar algún tipo de alarma, porque estamos a punto de pedirle al ordenador que divida entre cero. En mi versión, el programa imprime "¡Colisión!"

Cuando todo es como debe ser, el bucle interior calcula la distancia entre las estrellas, extrayendo la raíz cuadrada, d, del cuadrado de la distancia recién calculado. Seguidamente, divide 1000 entre el cuadrado de la distancia, cálculo que da la fuerza. La tarea final a realizar dentro del bucle interior consiste en determinar las componentes de la aceleración que experimenta la i-ésima estrella. Este valor se obtiene sumando la totalidad de las contribuciones de fuerza aportadas por las demás estrellas. Por ejemplo, la componente x de la aceleración puede escribirse, genéricamente, como sigue:

$$ax(i) \leftarrow ax(i) + f \times (x(j) - (x(i))/ d$$

En esta fórmula, f y d representan la fuerza y la distancia. La razón de la distancia que media entre las estrellas i-ésima y j-ésima, medida en la dirección del eje x, a la distancia total, d, es precisamente la fracción de la fuerza que actúa sobre la i-ésima estrella, en la dirección del eje x, a causa de la atracción de la j-ésima estrella. Las componentes de la aceleración, en las direcciones de los ejes y y z se calculan mediante fórmulas análogas.

Dos bucles más, que van uno a continuación del otro, completan el programa. El primero actualiza la velocidad y, el segundo, la posición. Se plantea aquí una cuestión sutil, que me señaló por vez primera John H. Hubbard, matemático de la Universidad de Cornell, cuyos consejos para calcular el conjunto de Mandelbrot me resultaron particularmente útiles [véase "Juegos de ordenador", octubre de 1985]. En efecto, puede calcularse la posición antes que la velocidad, sin que por ello se produzcan resultados de aspecto extraño. Sin embargo, con el tiempo, el movimiento de las estrellas resultaría desconcertantemente erróneo, pues tal operación violaría la ley de conservación de la energía.

El bucle de actualización de la velocidad se limita a sumar la aceleración a la velocidad, según la fórmula:

$$vx(i) \leftarrow vx(i) + ax(i)$$

Se está suponiendo aquí que los incrementos de tiempo son siempre iguales a la unidad de tiempo respecto de la cual está expresada la velocidad. La misma fórmula se utiliza para vy y vz. Los cálculos posicionales efectuados en el último bucle son igual de sencillos:

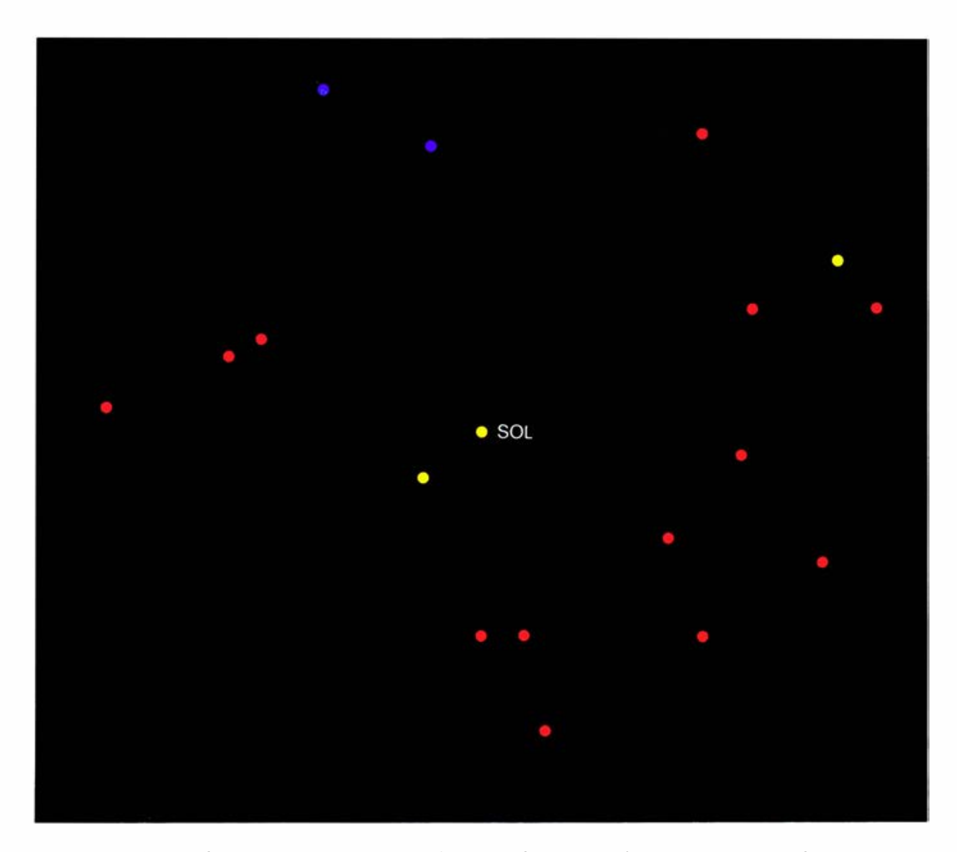
$$x(i) \leftarrow x(i) + vx(i)$$

Los valores de las tablas y y z se actualizan de manera idéntica. Apoyándose en la información que le facilita el último bucle, CUMULO sitúa cada punto sobre la pantalla bidimensional del monitor. Para ello, representa gráficamente las dos primeras coordenadas y desprecia la tercera. El resultado natural de semejante convenio es que z representa la profundidad; es fácil imaginar que uno está mirando al espacio situado más allá de la pantalla. Los valores arrojados por el programa de simulación de cúmulos resultan a veces muy grandes y, a veces, muy pequeños. Por esa razón es aconsejable utilizar aritmética de precisión doble, no sea que inadvertidamente queden redondeados números significativos.

El tiempo invertido por CUMULO para completar un ciclo de cálculo depende del número de estrellas que haya en nuestro sistema. Bastan 10 estrellas para producir efectos intrincados por su estética; hacen falta 100, e incluso 1000, para producir complejidades de cierto realismo. Desdichadamente, el número de pasos del ciclo fundamental de cómputo crece con el cuadrado del número de estrellas del cúmulo. Aunque los simuladores estelares han dado con un pulcro método que elimina esa dificultad, plantean otros problemas.

El peor de todos es consecuencia de que el programa constituye un sistema discreto que está tratando de remedar un sistema continuo. Las órbitas continuas se aproximan por medio de una sucesión de saltitos, que se apartan cada vez más de la verdadera trayectoria de una estrella por un cúmulo. Tales imprecisiones pueden corregirse en cierta medida gracias a ciertas regularidades estadísticas, pero cuando las estrellas llegan a aproximaciones muy cercanas, el sistema amplifica de modo antinatural y desastroso el efecto "de tirachinas".

Por ejemplo, si el ciclo computacional sitúa muy cercanas una estrella (Stella) de otra (Aster), un potente tirón gravitatorio exagera las componentes de aceleración de ambas. Tal exageración se infiltra a través de los cálculos hasta las componentes de la ve-



2. ¿Llegaría nuestro vecindario galáctico a formar un cúmulo?

NOMBRE DE LA ESTRELLA	COORDENADAS DE POSICION			COORDENADAS DE VELOCIDAD			COLOR	MASA
	X	Y	Z	VX	VY	VZ		
STRUVE 2398	68	−365	631	−5.69	4.76	3.35	ROJO	0.26
ROSS 248	464	−42	450	−8.75	1.13	−15.45	ROJO	0.17
61 DEL CISNE	394	−377	433	−2.78	22.03	0.02	NARANJA	0.69
LALANDE 21 185	−404	107	307	7.32	−0.47	−20.11	ROJO	0.39
PROCYON 5	−295	658	68	2.38	0.75	−3.65	AZUL	1.29
ESTRELLA DE BARNARD	−7	−371	30	−0.87	24.20	16.78	ROJO	0.21
EPSILON DE ERIDANO	408	534	−114	4.60	0.69	−0.50	NARANJA	0.74
WOLF 359	−462	136	62	−0.82	9.86	−5.94	ROJO	0.10
SIRIO	−98	514	−157	1.89	−2.21	−2.59	AZUL	2.96
LUYTEN 726-8	487	219	−175	2.08	10.80	−0.41	ROJO	0.19
ROSS 128	−683	44	13	2.51	−2.32	−4.09	ROJO	0.21
SOL	0	0	0	0.00	0.00	0.00	AMARILLO	1.00
TAU DE LA BALLENA	646	307	−208	0.52	−6.62	3.92	AMARILLO	0.85
ALFA DEL CENTAURO	−106	−86	−243	−1.95	4.68	4.51	AMARILLO	1.03
LUYTEN 789-6	608	−235	−182	−6.75	10.81	10.56	ROJO	0.13
LUYTEN 725-32	718	227	−233	4.70	6.16	0.51	ROJO	0.21
ROSS 154	111	−536	−241	1.79	1.36	−0.11	ROJO	0.24
EPSILON DEL INDIO	334	−194	−594	−3.54	17.71	2.28	NARANJA	0.69

3. Tabla en la que se da el catálogo de todas las estrellas, menos tres, de la vecindad de nuestro sistema solar

locidad, primero, y desde ellas a las coordenadas de posición. En la siguiente iteración, Stella se encuentra ya muy alejada de Aster y, por consiguiente, imposibilitada de restituirle el préstamo gravitatorio que aquélla le hizo. Se ha creado así una energía cinética ficticia, excesiva. Los cúmulos artificiales afligidos por este problema se evaporan más rápidamente aún que los cúmulos reales. Existen dos modos de sortear tal escollo; uno es difícil, fácil el otro. La opción difícil consiste en calcular la órbita kepleriana correspondiente al par. La órbita se mantiene en tanto las dos estrellas se encuentren próximas una a otra. Los teóricos consideran que ése es el método de calidad suprema, pues la fórmula orbital es perfectamente exacta. Un método más sencillo, si bien en ocasiones impreciso, consiste en subdividir los pasos temporales del ciclo fundamental de cómputo. Puede que los lectores deseen añadir esta maniobra especial a la versión refinada de CUMULO que voy a describir a continuación.

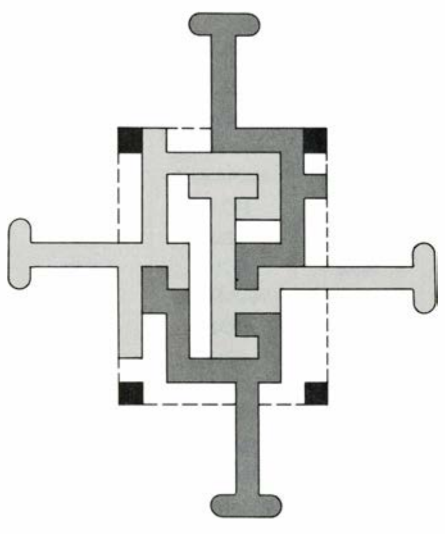
Del programa CUMULO puede deducirse otro, llamado SUPERCUMULO, mediante una serie de modificaciones. Primero, SUPERCUMULO incorpora a su ballet estrellas de masas diferentes. No hay dificultad en ello: basta cargar las masas al comienzo, en una tabla que llamaremos *m*. El cálculo de las fuerzas resulta algo más complicado: la fuerza ya no es proporcional a $1/d^2$, sino al producto de las masas dividido entre d^2. A renglón seguido, SUPERCUMULO incorpora también los tipos espectrales. Lo mismo que para las masas, antes de ejecutar el programa es preciso cargar una tabla (llamada *spec*). Sin embargo, tan sólo se la utiliza en la fase de presentación del ciclo básico. Los colores van desde el azul, para las estrellas de tipo 0, hasta el rojo para las de tipo M. Se omite el verde. La tercera ampliación de CUMULO permite tomar incrementos temporales arbitrarios en cualquiera de las versiones del programa.

En SUPERCUMULO se utiliza para el incremento de tiempo una variable que llamaremos *delta*. Especificándola al principio de una pasada, *delta* determina la cantidad de tiempo simulado que media entre ciclos sucesivos. Como es natural, este elemento de tiempo ha de afectar a las fórmulas de actualización, tanto de la velocidad como de la posición: en las fórmulas de velocidad aparecerá multiplicando a la aceleración; en las de posición, a la velocidad.

Podemos presentar ahora el método sencillo para describir los encuentros cercanos. Ante todo, es preciso definir qué se entiende por "cercano". Después podemos incluir en el programa una condición de verificación de cercanía, inmediatamente tras el punto en que se calcula la distancia entre dos estrellas. Si se está produciendo un encuentro cercano, SUPERCUMULO sustituye el valor de *delta* por la décima parte del que tenía, al menos hasta que ningún par de estrellas vuelva a estar tan próximo. Este proceder ayuda, qué duda cabe, a amortiguar los súbitos bandazos provocados por una variación discreta de la gravitación. Sin embargo, cuando los encuentros son verdaderamente muy cercanos, crea problemas mayores de los que resuelve. ¡Ahora, un acercamiento 10 veces mayor origina una fuerza gravitatoria 100 veces superior! Afortunadamente, tales encuentros de la peor clase son bastante raros. La técnica de subdivisión del tiempo se ha convertido en práctica normal en los programas de simulación de cúmulos tradicionalmente utilizados por los profesionales.

Si se pretende que SUPERCUMULO sea un programa astronómicamente significativo, harán falta unidades de distancia, de masa y de los restantes aspectos de la realidad física. Una unidad de medida adecuada al caso es la unidad astronómica (UA), que es igual a la distancia media entre la Tierra y el Sol. Las masas pueden medirse en masas solares; la medida de tiempos más adecuada parece ser el año. Adoptando esos convenios, la constante universal de gravitación vale 39. En SUPERCUMULO se utiliza para el cálculo de la fuerza esa constante en lugar del valor 1000.

Tenemos ya todo a punto para ejecutar cualquiera de los dos programas. En un ejercicio preliminar con CUMULO participan cuatro estrellas. Situémoslas en los vértices de un cuadrado que mida unos cinco centímetros en la pantalla. Además de hacer no nulas las coordenadas *x* e *y* antes mencionadas, conviene dar a cada estrella una coordenada *z* distinta de cero. Si el movimiento se confina al plano de la pantalla, los encuentros cercanos resultan



4. El cardo bidimensional de Jeffrey R. Carter

mucho más frecuentes. Las componentes de velocidad no deben ser muy grandes (en el intervalo de −5 a +5), y deben estar orientadas en un mismo sentido de rotación, como si las cuatro estrellas estuviesen subidas en un carrusel.

Para ensayar SUPERCUMULO puede servir el sistema de estrellas que vemos en la figura 2, que es el vecindario estelar de la Tierra dentro de nuestra galaxia. ¿Qué sucedería si el Sol y las estrellas más cercanas a él se extrajeran de la galaxia y se les permitiera danzar interminablemente por el espacio? ¿Se formaría un cúmulo? La cuestión quizá sea científicamente irrelevante, pero resulta divertido buscarle respuesta. Además, ésas son las únicas estrellas cuyas posiciones y velocidades se conocen con precisión [*véase la figura 3*].

Los cúmulos estelares son abiertos o globulares. Los abiertos constan de unas 1000 estrellas, mientras que los globulares pueden contarlas por millones. Los investigadores, como J. Garret Jernigan, del Laboratorio de Ciencias Espaciales de la Universidad de California en Berkeley, sólo han podido tratar cúmulos pequeños. Resulta hoy imposible abordar cúmulos globulares. Aún así, Jernigan y otros colegas pioneros, así Sverre J. Aarseth, de la Universidad de California en Berkeley, han estado observando, durante decenios, colapsos de cúmulos computarizados. El grado de colapsamiento se determina considerando un volumen esférico en el centro del cúmulo que contenga el 10 por ciento de su masa. El radio de esa esfera se denomina "radio del 10 por ciento". Se produce el colapso cuando el radio del 10 por ciento disminuye con el transcurso del tiempo. Inexorablemente, el núcleo del cúmulo simulado va haciéndose más y más denso. Dado que las estrellas simuladas son puntos matemáticos, nada terrible llega jamás a sucederles. No llega a formarse en el centro del cúmulo ningún agujero negro. Al menos, tal ha sido la experiencia de los teóricos. Aunque tampoco parecemos poder encontrar pruebas de colapso extremo en los cúmulos que hay sobre nuestras cabezas. Algo parece impedir allá arriba el derrumbe.

Tanto los experimentos modernos como los tradicionales pueden proporcionarnos una clave. En diversas ocasiones, un pequeño número de sistemas de estrellas binarias situadas en el centro de una simulación de un cúmulo han logrado prácticamente detener el colapso de las regiones del núcleo cumular. En uno de los experimentos de Jernigan, el sistema responsable parecía ser una sola estrella binaria. Según David Porter, uno de los doctorandos de Jernigan, tal vez se deba a que "las binarias muy próximas giran muy rápidamente una en torno a otra y despiden de una fuerte coz a las estrellas que vagabundean por el núcleo, lanzándolas a veces incluso hasta una familia más enrarecida de estrellas que rodean al núcleo, llamada halo. Ese mecanismo pudiera evitar que las estrellas se apiñasen demasiado en el núcleo".

Jernigan solía dedicarse a la observación de estrellas de rayos X. Al irse centrando en los cúmulos la búsqueda de fuentes de emisión X, se interesó progresivamente por los cúmulos en tanto que objetos astronómicos por derecho propio. La simulación ofrecía una vía eficaz para su exploración.

Jernigan, que se autodescribe como "el chico nuevo del barrio", ha descubierto una importante mejora para las tentativas y esfuerzos de simulación. En CUMULO y demás programas similares, para n estrellas, un solo ciclo de cómputo requiere aproximadamente n^2 pasos. El ciclo de Jernigan tan sólo requiere $n \times log(n)$ pasos. Para ello organiza su cúmulo agrupando las estrellas por pares de vecinas. Cada par se remplaza por una masa y una velocidad ficticias, que resume el comportamiento del par. El mismo proceso se aplica entonces a las resultantes de los pares, considerándolas como si fueran las estrellas originales. Prosiguiendo de este modo se construye una estructura de nodos másicos agrupados y vueltos a agrupar, que generan un árbol. El nodo único que figura en su raíz representa simultáneamente la totalidad de las estrellas. Se pueden calcular entonces los movimientos del nodo central y, después, los de todas sus ramas hasta llegar a las estrellas aisladas.

¿Será ésa la técnica del futuro? Según Jernigan, contribuye ciertamente a acelerar el proceso. No obstante, resulta más probable que las generaciones posteriores de programas de simulación de cúmulos se asemejen a la variedad híbrida utilizada por Alan P. Lightman, del Centro de Astrofísica del Observatorio del Harvard College, y por Stephen L. W. McMillan, de la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign: las estrellas del núcleo se tratan por los métodos de simulación directa antes explicados; las estrellas periféricas se estudian mediante un modelo estadístico, como si formasen un gas.

Los lectores que dominen el lenguaje de programación llamado APL tienen a su disposición una nueva e interesante publicación de Gregory J. Chaitin, del Centro de Investigación Thomas J. Watson de IBM en Yorktown Heights, Nueva York. Se titula *An APL2 Gallery of Mathematical Physics*, y es un folleto de 56 páginas que contiene explicaciones de las cinco principales teorías físicas, incluidas las que describen el movimiento de satélites en el espacio, tanto newtoniano como relativista. Se dan listados de programas de ordenador, en APL, que ilustran cada una de las teorías.

En la sección del pasado diciembre describí tres rompecabezas: el desconcertante cardo de Bill, la cornucopia de Coffin y el enigma de Engel. Cientos de lectores se las han visto con ellos. Mientras unos buscaron la mágica combinación de movimientos capaz de desarmar el cardo, otros se devanaron los sesos con la colocación de poliominós en una bandeja. Los miembros de este último grupo tendrán que salir adelante sin ayuda de los amigos: cada rompecabezas es único. Hay todavía otros lectores que siguen dándole vueltas a las ruedas del enigma de Engel, en un vano intento de recomponer su orden primitivo. Algunos de los devotos parecen haber tenido éxito, al menos en el plano abstracto, pues han empezado a llegar declaraciones de haberlo resuelto.

Mi petición de proyectos de cardos bidimensionales se ha traducido en la arribada de gran número de diseños. El más encantador de los recibidos hasta

la fecha es el que se muestra en la figura 4. El problema consiste en retirar las cuatro piezas de la bandeja, simbolizada por el rectángulo de línea de trazos. Las piezas únicamente pueden moverse en las cuatro direcciones: hacia arriba, hacia abajo, a la derecha y a la izquierda, y han de permanecer confinadas en el plano del papel. Los cuatro cuadrados de las esquinas han de considerarse amovibles. ¿Qué pieza es preciso mover la primera? Jeffrey R. Carter, de Littleton, Colorado, diseñó este *tour de force* bidimensional. Nuestro carácter de seres tridimensionales nos confiere la ventaja de visualizar el total; un ser bidimensional que quisiera resolverlo tendría que tirar y empujar por los costados de una caja misteriosa.

P. Clavier, de Dallas, Texas, proclama disponer de una solución algorítmica del enigma de Engel. Clavier dice que su programa, escrito en BASIC y que funciona en un ordenador portátil Texas CC-40, necesita entre 300 y 700 jugadas para resolver una desordenación típica. La solución lleva a la práctica seis operaciones fundamentales de intercambio de piedras y huesos. Los lectores que se valieron de la representación secuencial que yo sugería tal vez hayan lanzado demasiado abiertas sus redes, pues las soluciones de la sucesión numérica no son forzosamente soluciones del enigma. Al lanzar mi sugerencia tenía yo conciencia de que los huesos habían quedado excluidos de la representación. "Bueno", me dije en su momento, "cuidemos de las piedras y los huesos cuidarán de sí mismos". No es así. Es preciso intercalar entre las piedras símbolos representativos de los huesos.

Al parecer, Robert Carlson, de Los Altos, California, ha inventado el rompecabezas definitivo del tipo "desordenación y reordenación". Tan complicado es de construir, que tiene que conformarse con verlo en su monitor. El rompecabezas es un icosaedro, sólido platónico de 20 caras triangulares. Cada vértice es lugar de una posible operación de desordenación. Cuando se hace girar un vértice, los cinco triángulos concurrentes en él giran también. Cada triángulo tiene tres colores. En la forma ordenada, los colores adyacentes a cada vértice son los mismos. Carlson ha preparado una versión de su rompecabezas computarizado para el IBM PC. Además de los colores, da una nota musical para cada movimiento.



5. El cúmulo globular Messier 13, de la constelación de Hércules

Taller y laboratorio

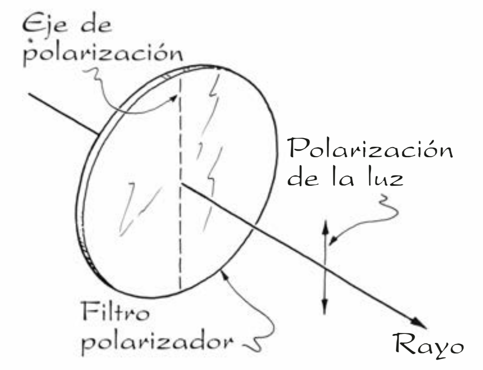
Un económico polarímetro casero para analizar sustancias ópticamente activas

Jearl Walker

Las soluciones que contienen sustancias ópticamente activas, pensemos en el azúcar, cambian la polarización de la luz que las atraviesa. Ese cambio revela asimetrías en la constitución de las sustancias. El fenómeno posee, además, aplicaciones prácticas: control de la concentración de azúcar en productos alimentarios y el refinado del azúcar. Sam Epstein, de Los Angeles, ha ideado un económico polarímetro que mide la actividad óptica.

Según un modelo clásico, la luz se puede representar como un movimiento ondulatorio de campos eléctricos oscilantes. Muy común es también representarla en forma de rayo, al objeto de hacer constar su dirección de propagación. Superpuestos a este rayo se colocan vectores que simbolizan la dirección, el sentido y la intensidad del campo eléctrico asociado. Estos vectores son siempre perpendiculares al rayo y su intensidad y dirección varían de tal modo que en conjunto semejan una onda. El campo eléctrico parece así oscilar cuando la luz pasa por un punto.

Mientras la luz no está polarizada, el campo puede oscilar en cualquier dirección perpendicular al rayo. Pero si la luz pasa por un filtro polarizador, las oscilaciones quedan limitadas a un plano que define en cada punto del rayo una dirección perpendicular a éste: se dice de esta luz que está polarizada en dicha dirección. La polarización se representa mediante un vector de doble flecha. Una línea imaginaria paralela a la polarización (el eje de polarización) representa el efecto del filtro.



1. Efecto de un filtro polarizador

Si en el trayecto del haz se coloca un segundo filtro polarizador, la intensidad de la luz que lo atraviese dependerá de la orientación del mismo. Si su eje de polarización es paralelo a la oscilación de la luz incidente, se transmitirá toda ella. Pero si el eje es perpendicular a la oscilación, la luz queda interceptada por completo. Para las orientaciones intermedias del filtro pasan cantidades intermedias de luz.

El filtro más cercano a la fuente luminosa se llama polarizador; el otro es el analizador. Lo que se ve al emplear el aparato es la luz que sale del analizador, al que se hace girar respecto a la dirección del rayo original. Cuando los ejes de ambos filtros corren paralelos se percibe la máxima luminosidad. Girando el analizador 90 grados no se ve luz alguna. Esta posición del analizador se llama punto final.

Las soluciones de sustancias ópticamente activas, tales como ácido láctico, ácido tartárico, nicotina, trementina, aminoácidos y vitaminas, cambian la dirección de polarización de la luz que los atraviesa. Todos ellos se distinguen de otras sustancias por su estructura tridimensional. Una sustancia ópticamente activa posee uno o más átomos de carbono, cada uno de los cuales está enlazado a uno de cuatro posibles tipos diferentes de átomos o grupos de átomos. Cuando la luz pasa por un átomo de carbono y sus vecinos, el campo eléctrico interactúa con los átomos de un modo tal que la dirección de polarización rota en torno al rayo.

Supongamos que se coloca entre los filtros una cubeta con una solución de una sustancia ópticamente activa. Cuando la luz polarizada atraviese la solución, su polarización girará alrededor del rayo. Por tanto, cuando llegue al analizador, tendrá una orientación diferente de la que presentaba antes de introducir la cubeta. O sea, para cortar el paso a la luz habrá que girar el analizador hasta un nuevo punto final. La actividad óptica de las soluciones se estudia midiendo el ángulo que debe girarse el analizador para que no pase nada de luz.

La dirección de la rotación de la polarización de la luz se especifica desde la perspectiva del observador. La solución se llama dextrógira si la rotación se produce en sentido horario y levógira si es en sentido antihorario. El valor de la rotación lo determina el número de moléculas ópticamente activas que la luz cruza en su trayecto por la cubeta. Con cubetas mayores y concentraciones más altas aumenta la rotación de la polarización. La rotación varía también con la longitud de onda de la luz.

Al objeto de describir hasta qué punto una sustancia cambia la dirección de polarización de la luz, se habla de "rotación específica". En lo que respecta a los trabajos de Epstein este valor lo da el ángulo que gira la polarización cuando la luz atraviesa un decímetro de una solución cuya concentración es de 100 gramos por 100 centímetros cúbicos. (A veces la rotación específica se define en función de otras unidades.) La longitud de onda de la luz acostumbra a tomarse de 589 nanómetros, que corresponde a la raya amarilla del espectro de emisión del sodio. La temperatura de la solución suele ser de 20 grados Celsius.

El polarímetro de Epstein trabaja con la luz de una lámpara de 60 watt. La luz atraviesa un filtro de color, una lente colimadora y luego penetra en una caja en cuyo interior un espejo la refleja hacia arriba. Dentro de la caja pasa por un filtro polarizador y una cubeta que contiene la solución problema. La luz prosigue a través de una lente condensadora y un analizador, llegando por fin a un ocular mediante el cual se determina el punto final.

La lámpara y el portalámparas se montan en un soporte de madera y se cubren con una lata de conservas invertida. Esta lata se monta a unos dos centímetros por encima del chasis para que el aire pueda fluir a su interior. En la cara superior de la lata se practican orificios por donde pueda escapar el aire calentado por la lámpara. De un agujero abierto en un costado de la lata sale un tubo de cloruro de polivinilo (CPV) de veinticinco milímetros de diámetro interno. El extremo exterior del tubo de CPV lo cubre una lámina delgada de vidrio esmerilado.

Puesto que la mayoría de los datos acerca de la rotación específica de las sutancias ópticamente activas están tabulados para la raya amarilla del sodio, Epstein filtraba la luz blanca de la lámpara. Construyéndose un filtro se ha ahorrado el precio de un filtro de color profesional. Este montaje se hace con dos portaobjetos de microscopio que sirven de ventanitas en una cubeta rectangular; la parte superior está hecha de plástico, ajustado sin huelgo en su posición para reducir la evaporación. El resto de la cubeta se pega con epoxi (una resina sintética transparente). Este recipiente contiene una solución acuosa de dicromato potásico al diez por ciento (10 gramos por cada 100 mililitros de solución). Se introduce en una envuelta protectora de chapa metálica o masonita; el conjunto se instala en un montante de madera de modo que las ventanitas queden a la altura conveniente para interceptar la luz.

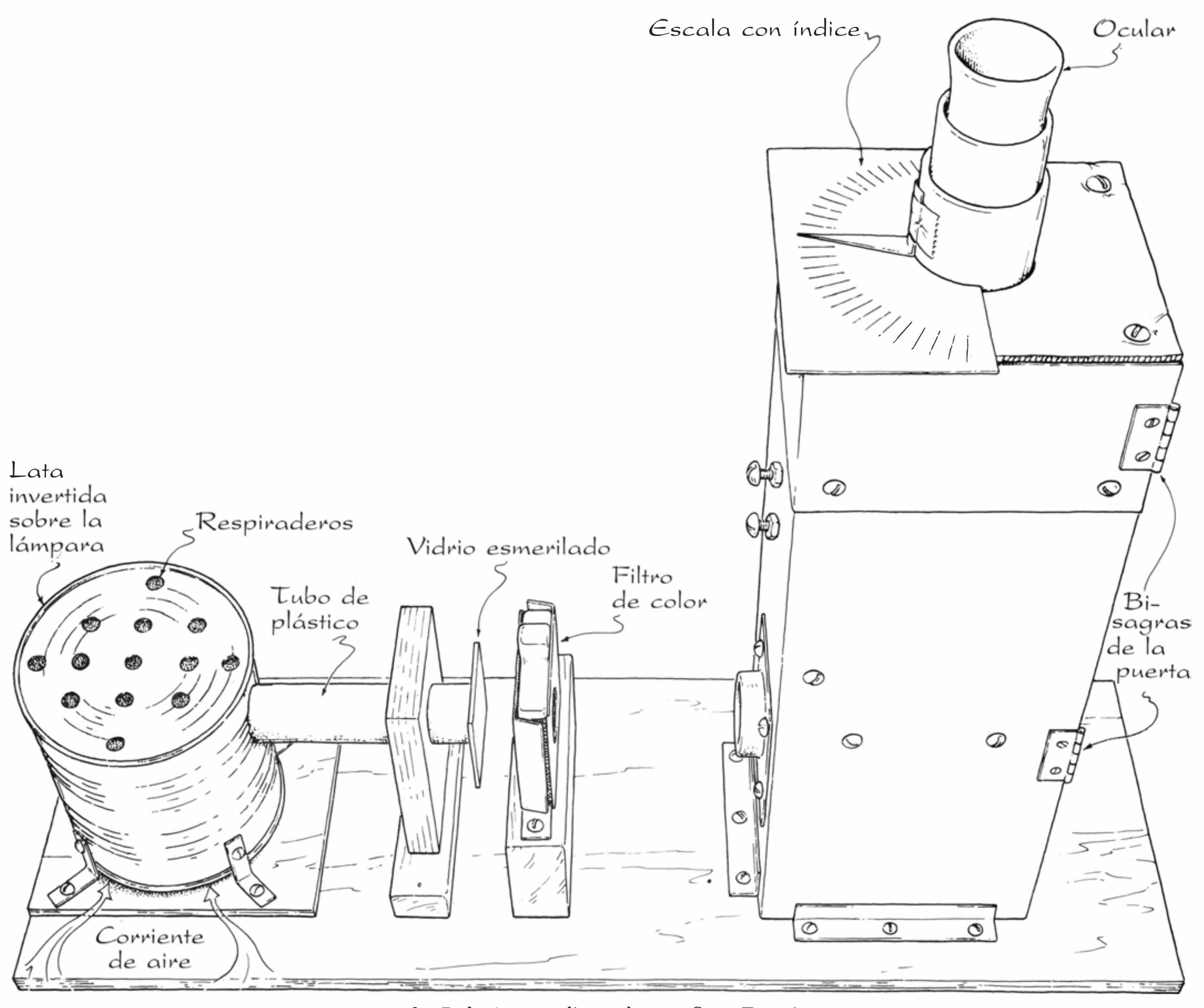
La solución de dicromato potásico actúa de filtro ya que transmite una estrecha zona de longitudes de onda en torno a la raya amarilla de emisión del sodio. Por consiguiente, la combinación de Epstein de una fuente de luz blanca con este filtro de color proporciona aproximadamente la misma luz que una lámpara de emisión de sodio profesional. (El filtro de color puede hacerse también con un cuadrado de filtro gelatinado Kodak Wratten de color naranja del número 24.)

El alojamiento para el resto del aparato se construye de contrachapado de seis o siete milímetros, o de masonita, formando una estructura rígida. El interior se pinta de negro mate para eliminar la luz difusa. En un costado de esta caja hay una puerta que facilita el acceso a la cubeta de muestras.

La distancia entre el filtro de color y el colimador es igual a la distancia focal de éste, por lo que la luz procedente del filtro atraviesa el resto del aparato más o menos en forma de haz. El colimador se monta en un trozo de tubo de CPV que lo oculta a la luz del exterior. La luz ilumina un espejo encolado con epoxi a un soporte de madera. Este espejo se monta a 45 grados con respecto a la horizontal. Advierte Epstein que es crucial alinear correctamente el trayecto óptico.

Por encima mismo del espejo hay un separador de contrachapado o masonita. El espejo dirige la luz por un orificio de unos 15 milímetros abierto en el separador. El polarizador está encolado a la parte inferior de este separador.

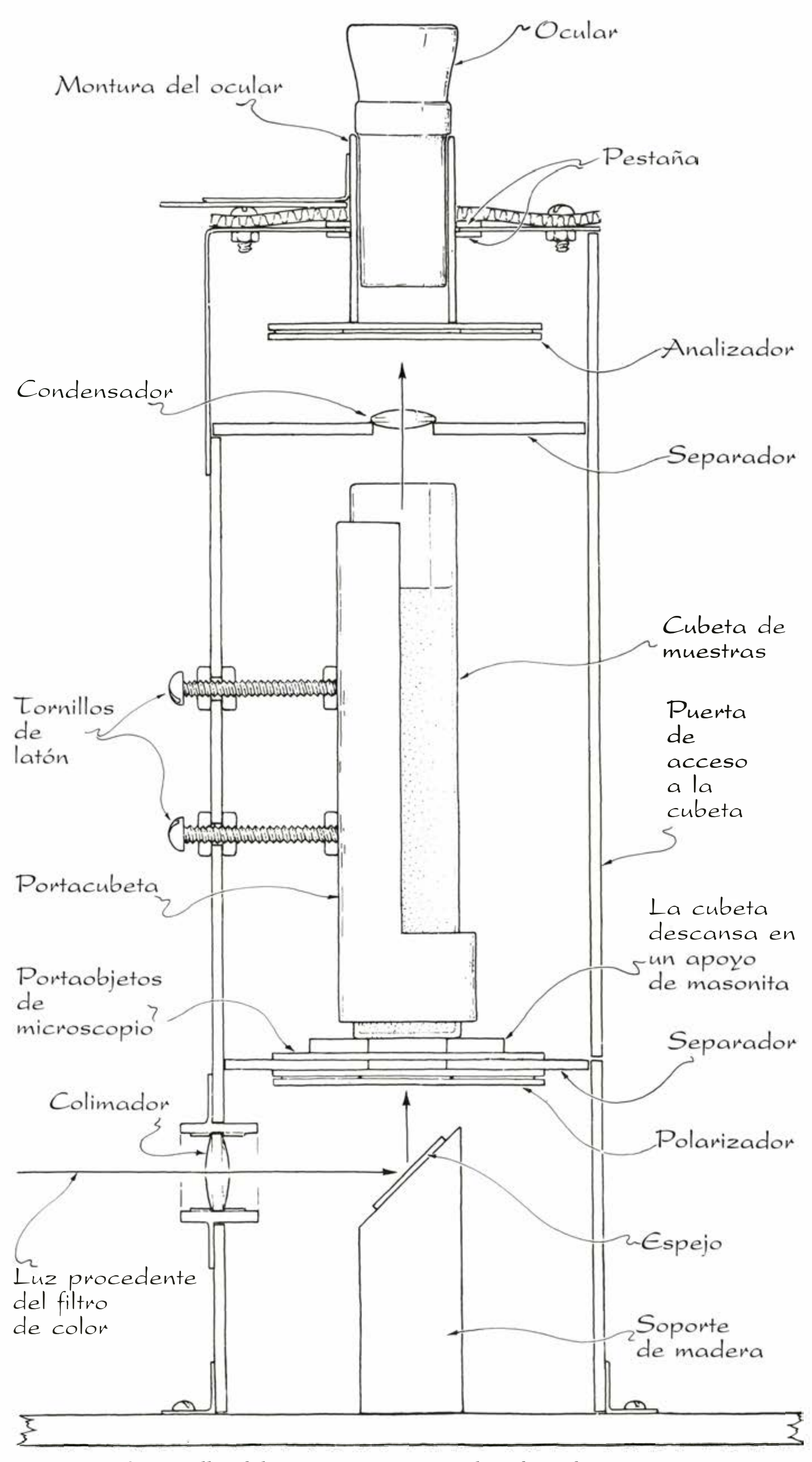
El polarizador lo construyó Epstein intercalando un cuadrado de filtro polarizador de 25 milímetros de lado entre dos portaobjetos de microscopio. La posición del cuadrado se fija merced a dos trozos de cartulina. Los cantos de los dos portaobjetos se cubren con



2. Polarímetro diseñado por Sam Epstein

cinta adhesiva transparente que se prolonga hacia dentro unos dos o tres milímetros para que el filtro polarizador no se deslice fuera de su sitio. En ambas caras de los trozos de cartulina se deposita un poco de epoxi para encolar el conjunto.

Para proteger el polarizador y el espejo de goteos de la solución problema, de un lado a otro del orificio del separador se encola un portaobjetos de microscopio. Encima del portaobjetos hay un apoyo de masonita de 25 por 50 milímetros, con un orificio que coincide con el orificio del separador. La cubeta que contiene la solución problema descansa en este asiento y se mantiene en el trayecto de la luz mediante un tubo de CPV de 15 centímetros, aserrado de modo que la sección transversal de los 12 o 13 centímetros de arriba sea un semicírculo. Este tubo está unido al alojamiento del aparato con dos tornillos de latón.



3. Detalles del sistema que encierra la cubeta de muestras

La cubeta de muestras debe tener el fondo plano para que no deforme el haz luminoso. Epstein utiliza tubos de comparación de color de 50 mililitros (tipo EXAX, corto) que pueden encontrarse en la mayoría de las tiendas de material de laboratorio. Estos tubos se deslizan en el portacubeta de CPV y descansan sobre el apoyo de masonita.

Como los tubos se venden bastante caros, Epstein sugiere la construcción de una cubeta casera a partir de un tubo de plástico transparente de 25 milímetros de diámetro y 1 milímetro de espesor de pared. Para ello se corta un trozo de tubo de unos 15 centímetros y se amola un extremo hasta dejar el canto plano. A este extremo se encola un trozo de portaobjetos de unos 4 centímetros, centrándolo en el tubo. Se tiene que pegar con epoxi y dar un sellado estanco al agua.

Este montaje ofrece dos inconvenientes. Por una parte habrá que modificar el portacubeta de CPV para que la cubeta se ajuste en su posición. Y un problema más grave: la cubeta puede estropearse si se experimenta con algunos tipos de disolventes orgánicos.

Encima del portacubeta hay una lente condensadora que dirige la luz procedente de la muestra a través del analizador y el ocular. El analizador está construido de manera análoga al polarizador, pero con una importante diferencia, y es que los filtros están sesgados. En el centro de un cuadrado de 3 cm de lado de filtro polarizador se recorta un segmento triangular de cinco grados. Se juntan de nuevo las dos partes del filtro restante y se recortan para que formen un cuadrado de 25 mm de lado. Este conjunto se empareda entre dos portaobjetos de microscopio.

Esta disposición oblicua de los filtros del analizador facilita la determinación del punto final. De otro modo habría que adivinar cuál es la posición del analizador que mejor elimina la luz que deja pasar la solución problema. Pero con los filtros sesgados nos limitamos a comparar la luminosidad relativa de la luz que atraviesa cada porción del dispositivo filtrante; sabremos que hemos obtenido el punto final cuando ambas estén igualmente luminosas. Si se gira

el analizador en un sentido u otro a partir del punto final, una porción se ilumina y la otra se oscurece. Así pues, esa disposición sesgada de los filtros permite el ajuste fino de la posición del punto final.

El analizador se encola al fondo de la montura del ocular. Esta montura se introduce por un orificio del alojamiento, donde se mantiene merced a dos pestañas, en el que puede girar libremente. El ocular puede constar de una sola lente o bien de un sistema de lentes de pocos aumentos. Alrededor de la montura hay una escala marcada en grados.

Para montar el índice en la escala se enciende la lámpara y se gira la montura del ocular (y, por tanto, el analizador), observando la intensidad de la luz por el ocular. Se determina la posición para la cual las dos porciones del analizador se presentan con idéntica iluminación. Se fija entonces un índice en la montura del ocular de modo que señale cero en la escala rotatoria.

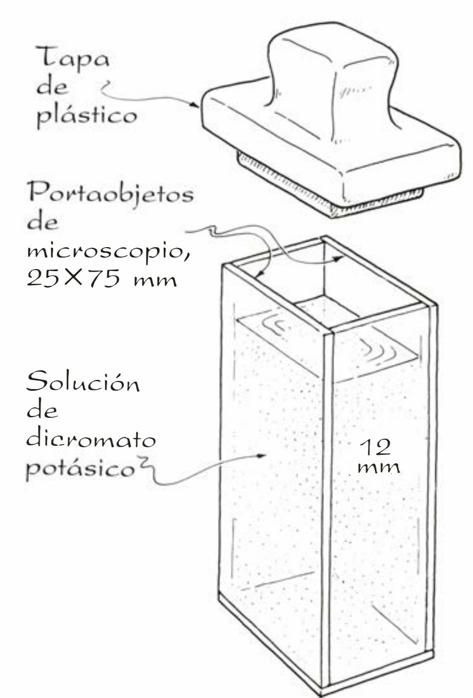
A menudo el fondo de una cubeta de muestras presenta imperfecciones ópticas que alteran la polarización de la luz. Para eliminar tal posibilidad se llena cada cubeta de 50 mililitros de agua y se instala en el aparato. Se gira el portacubeta, observando la luz por el ocular, hasta conseguir la imagen global y el punto final mejores. Entonces se hace una señal permanente en el costado del portacubeta y otra en la cubeta en correspondencia con la primera. Siempre que se emplee esa cubeta se colocará en su soporte con las marcas alineadas. Esta operación se repite con todas las cubetas.

Sugiere Epstein ensayar la actividad óptica de una solución de sacarosa (azúcar común). Se comienza con una cubeta de muestras con 50 milímetros de agua. Esa cubeta se instala en el polarímetro con la señal de su costado alineada con la señal del portacubeta. Se actúa en el ocular hasta hallar el punto final y se anota el punto de la escala circular indicado por el índice.

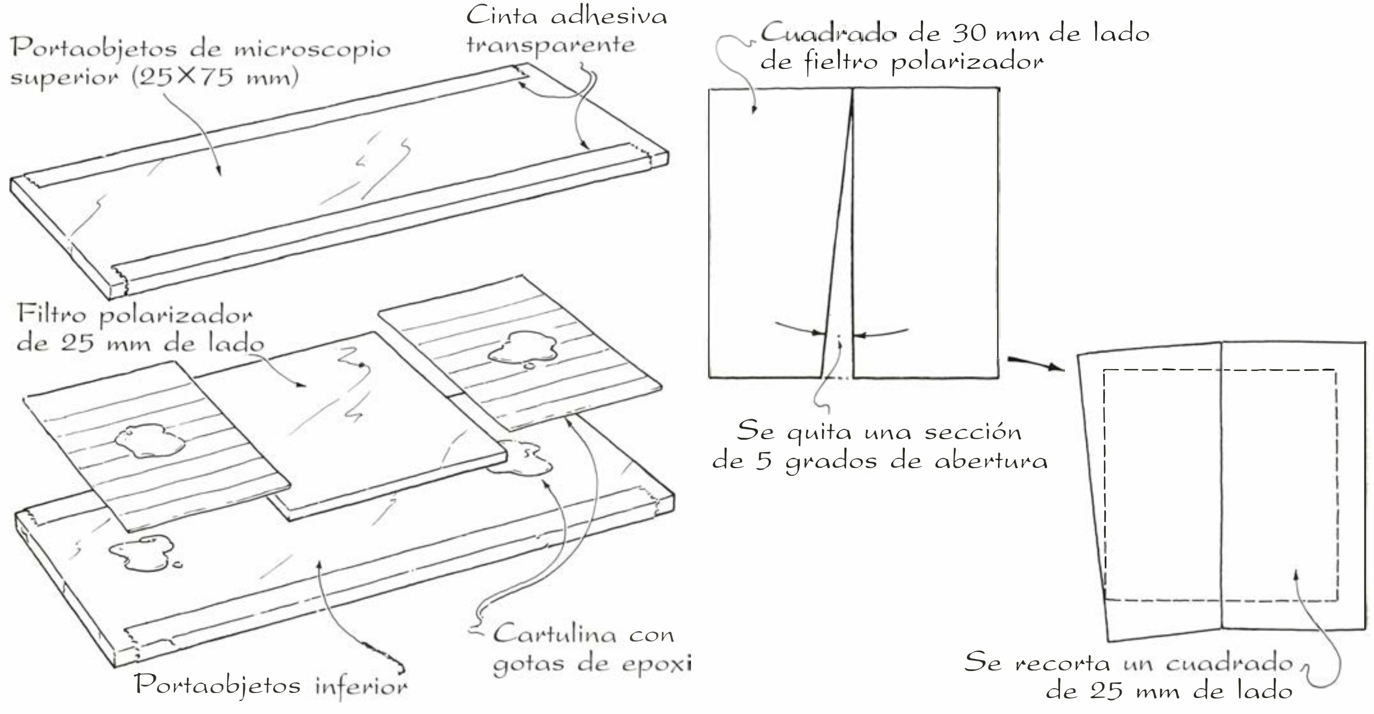
El agua se cambia por 50 mililitros de solución de azúcar a una concentración de 20 gramos por 100 mililitros. Se vuelve a buscar el punto final. Epstein descubrió que éste aparecía girado en sentido horario unos 17 grados con respecto a su posición en la escala cuando se examinaba sólo agua.

Esta rotación puede asimismo averiguarse por cálculo. La rotación específica del azúcar es de 66,5 grados en sentido horario. En el experimento de Epstein la luz recorre 1,3 decímetros. Para calcular la rotación esperada, se multiplica la rotación específica por la concentración (gramos por mililitro) y por el recorrido (decímetros). La rotación esperada resulta ser de unos 17 grados en sentido horario. Puede que a alguien le interese determinar la dependencia de la rotación con la concentración de azúcar. En tal caso, comiéncese por la solución más concentrada y dilúyase gradualmente, a la vez que se va midiendo la rotación.

También investigó Epstein en torno a una muy conocida reacción en la que la sacarosa se escinde en dos azúcares más sencillos, dextrosa y levulosa. (El proceso se llama inversión.) En un frasco de 100 mililitros se disuelven 20 gramos de sacarosa en 50 mililitros de agua. Mézclese bien. Se preparan 10 mililitros de una mezcla de ácido clorhídrico y agua en proporción de uno a tres respectivamente. Esta mezcla se añade al frasco y vuelve a agitarse la solución. En el frasco se introduce un

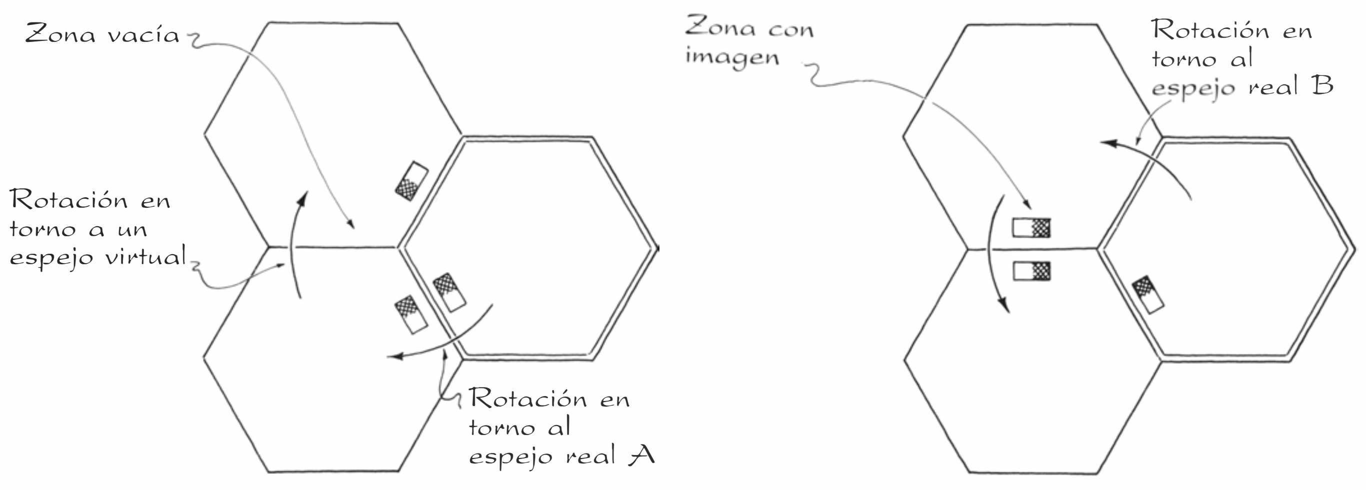


4. Filtro de color de Epstein



5. Montaje del polarizador

6. Partes del polarizador sesgado



7. Ambigüedad en un sistema de espejos hexagonal

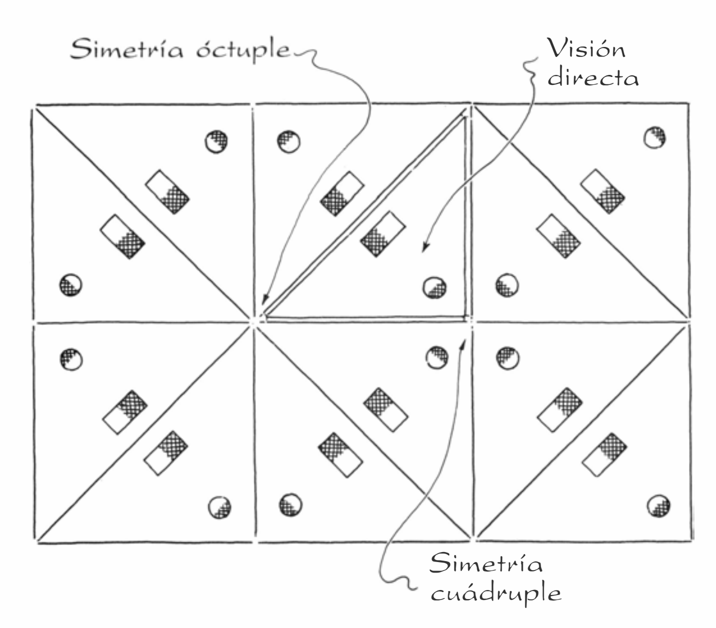
termómetro y el recipiente se pone al baño maría a 70 grados C. Contrólese la temperatura hasta que se alcancen los 67 grados. Manténgase la mezcla en el baño durante cinco minutos más. (Que la temperatura de la solución no rebase los 69,5 grados.)

El frasco se traslada a otro baño de agua a 20 grados C. Cuando la temperatura de la solución descienda a 35 grados, el frasco se retira del baño. Luego, cuando la temperatura de la solución alcance los 20 grados, se enjuaga el termómetro con unos 25 mililitros de agua, dejando que ésta caiga en el frasco. Se añade agua suficiente para que el volumen contenido en el frasco alcance los 100 mililitros. Vuelva a mezclarse el contenido.

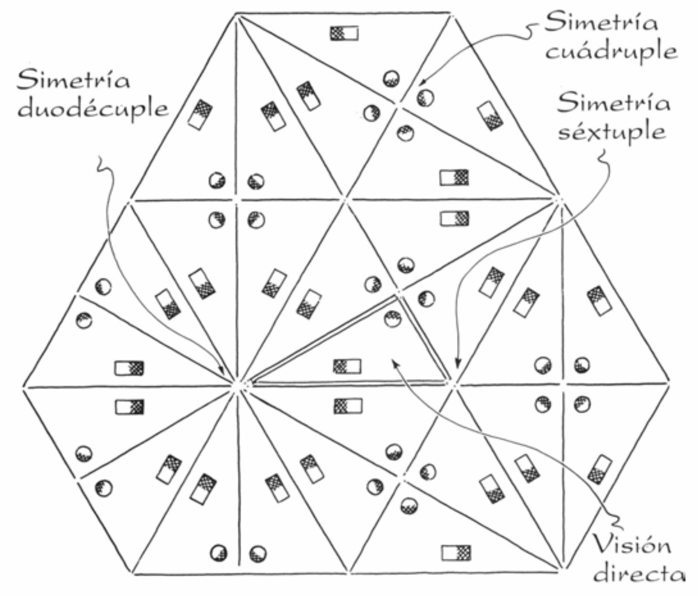
El frasco se introduce en el baño a 20 grados durante otros 15 minutos. Si hace falta, se añadirá agua suficiente para mantener el volumen en los 100 mililitros. Remover el contenido y verter 50 mililitros del mismo en una cubeta de muestras. La cubeta se coloca en el polarímetro y se mide la rotación de la polarización de la luz producida por la solución. Epstein midió una rotación en sentido opuesto al de las agujas del reloj de unos 2,8 grados.

El ácido clorhídrico cataliza la descomposición de la sacarosa, produciéndose 10,5 gramos tanto de dextrosa como de levulosa. La rotación específica de la dextrosa es horaria, de 52,5 grados; la rotación específica de la levulosa es antihoraria, de 93 grados. Calculando las rotaciones producidas por cada sustancia en la cubeta, resulta que la dextrosa gira unos 7,16 grados horarios la polarización de la luz y la levulosa unos 12,7 grados antihorarios. Por tratarse de rotaciones opuestas, el cálculo de la rotación media equivale a dividir por dos la diferencia entre ambas cifras. El resultado es de unos 2,8 grados antihorarios, tal como midió Epstein.

Reviste cierto interés estudiar la actividad óptica de sustancias tales como los jarabes de maíz y de arce o los caramelos. Para ello se introducen 25 mililitros del jarabe en un frasco de 100 mililitros, acompañados de unos 25 mililitros de agua del grifo y así asegurar que todo el jarabe pasa al frasco. Se añaden dos gotas de hidróxido amónico concentrado, que sirve de catalizador. Mézclese bien el contenido, añádase agua hasta completar 100 mililitros y mézclese otra vez. Luego se vierten 50 mililitros en una cubeta de muestras y se mide la rotación de polarización. Las moléculas de los azúcares se reorganizan entre sí por el proceso de mutarrotación hasta llegar a un equilibrio. Durante este tiempo, la actividad óptica de la solución varía. Epstein sugiere to-



8. Calidoscopio con dos tipos de simetría



9. Calidoscopio con tres tipos de simetría

mar lecturas de la rotación de polarización aproximadamente cada 15 minutos hasta que desaparezcan las variaciones.

Un procedimiento similar puede servir también para estudiar la actividad óptica de distintos tipos de miel. El método de inversión de azúcares puede emplearse además para estudiar la actividad óptica de la gelatina, refrescos y otros líquidos que contengan azúcar. Si la gelatina está condimentada, hay que asegurarse de que sea de variedad naranja, al objeto de obtener un color cercano al de la luz amarilla del sodio. Otro ensayo no menos sugestivo sería comparar las rotaciones de polarización de zumos de frutas puros y edulcorados.

El mes pasado me ocupé de la óptica de los calidoscopios compuestos de dos o tres espejos. En ambos tipos se puede ver directamente el objeto y una serie de imágenes adicionales reflejadas en los espejos. En los sistemas de dos espejos las imágenes se encuentran en sectores en forma de porción de tarta agrupados en torno al vértice definido por la intersección de los espejos. En los sistemas de tres espejos el campo visual aparece completamente lleno de imágenes. En los dos casos, las imágenes se perciben en un plano, llamado campo de imagen, que contiene la visión directa.

La mayoría de los montajes de tres espejos crean campos de imagen ambiguos, en el sentido de que el contenido de cualquier zona del campo depende del ángulo con el que se mire el calidoscopio. Supongamos que en cierto lugar del campo se ve una bolita roja. Si cambiamos de perspectiva, a esa bolita puede reemplazarla otra cosa. Los campos de imagen en un calidoscopio cuyos espejos formen un triángulo equilátero o un rectángulo no son ambiguos, es decir, su contenido no depende de nuestro ángulo de visión.

¿Qué otros sistemas de espejos dan campos de imagen inambiguos? Creía en un comienzo que la única condición era que el sistema óptico llenase el campo de imagen con reproducciones de la visión directa que no se solaparan entre sí, del mismo modo que se cubriría un suelo de baldosas iguales. He descubierto mi equivocación al considerar la disposición hexagonal de espejos que se muestra en la figura 7. En cada parte de la ilustración aparecen la visión directa y dos hexágonos reflejados. Un modo fácil para ver cómo se disponen los hexágonos reflejados consiste en girar la visión directa tomando un canto como eje hasta que vuelva a yacer en el campo de imagen. Luego, se gira otra vez el hexágono reflejado con centro en uno de sus bordes para formar un segundo hexágono reflejado.

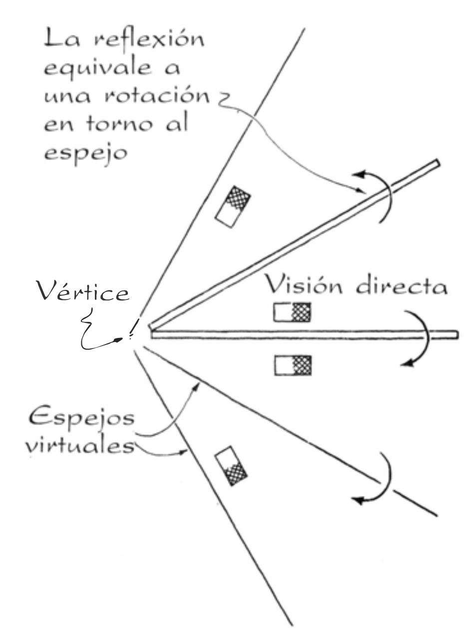
La primera parte de la ilustración indica que empecé con la visión directa y proseguí en sentido horario para hallar los dos hexágonos reflejados. Primero giré la visión directa en torno al espejo real *A* para formar el hexágono reflejado de la parte inferior izquierda. Luego giré ese hexágono en torno a su borde superior para formar el hexágono de la parte superior izquierda.

El borde de un hexágono reflejado se llama espejo virtual porque funciona a todos los efectos como un espejo pese a ser sólo la imagen de uno de ellos. Así, el segundo hexágono reflejado lo origina un borde que sirve de espejo virtual. Mis operaciones dan por resultado dos hexágonos reflejados que vería un observador si mirase al espejo *A* en dirección a la posición de los hexágonos en el campo imagen.

La segunda parte de la ilustración muestra el camino seguido para hallar los hexágonos reflejados, pero procediendo ahora en sentido antihorario; así se reproduce la imagen que vería un observador si mirase al espejo *B*. Adviértase que los dos conjuntos de hexágonos reflejados difieren en contenido. El campo imagen resultante es ambiguo.

Tras jugar con hexágonos y otros polígonos comprendí, finalmente, qué disposiciones de espejos dan campos de imagen inambiguos. Cualquiera que sea la disposición, la clave reside en examinar cada vértice donde concurran dos espejos. Al mirar al sistema se ve un sector de la visión directa y alrededor del vértice aparecen reflexiones de ese sector. Para determinar las reflexiones, imagínese que se gira el sector de la visión directa en torno a uno de sus lados, hasta que vuelva a estar en el campo imagen. Luego se gira el nuevo sector en torno a su lado. Se prosigue con estas rotaciones, tanto en sentido horario como antihorario, hasta que los sectores comiencen a solaparse. Si sus contenidos se solapan exactamente, el campo de imagen en torno al vértice es necesariamente inambiguo. Los únicos ángulos del vértice que dan este resultado son divisores pares de 360 grados.

Para que un sistema de espejos dé campos de imagen inambiguos todos



10. Determinación de los sectores de una agrupación

los vértices deben cumplir esta condición. Tal como ya sabía, el triángulo equilátero y el rectángulo la satisfacen. Mas, para mi sorpresa, solamente hay otros dos polígonos que la satisfacen: dos triángulos rectángulos, uno con ángulos de 45 grados y otro con ángulos de 30 y 60 grados. Ignoro si estos sistemas ya están descubiertos.

Los cuatro polígonos que generan campos inambiguos difieren en los tipos de simetría que aparecen en los campos. Los triángulos equiláteros producen agrupaciones de simetría séxtuple. Cada una de estas agrupaciones consta de seis imágenes, que son reproducciones exactas o reflejadas de la visión directa. El campo imagen de un rectángulo de espejos se compone de agrupaciones cuya simetría es cuádruple. Los sistemas en triángulo rectángulo ofrecen agrupaciones que despliegan más tipos de simetría. En uno de ellos, el triángulo rectángulo del vértice produce una simetría cuádruple y, el ángulo de 45 grados, una simetría óctuple.

Los sistemas con ángulos de 30 y 60 grados exhiben los motivos calidoscópicos más hermosos, pues ofrecen tres tipos de simetría, las máximas presentadas en un campo de imagen inambiguo. El ángulo recto crea una simetría cuádruple, el ángulo de 60 grados una simetría séxtuple y el de 30 grados una simetría duodécuple. No cuesta mucho construir un calidoscopio de esta clase, porque los espejos forman un triángulo rectángulo cuya hipotenusa dobla, en longitud, el cateto pequeño.

Libros

Medicina del siglo xix, biofísica, neurología, ciencia española y fronteras del universo

Pedro Laín Entralgo, Carlos Pérez, J. J. Zarranz, M. Artigas, Juan Vernet y Ramón Canal

CIENCIA Y ENFERMEDAD EN EL SIGLO XIX, por José M. López Piñero. Ediciones Península; Barcelona, 1985. Más de una vez he dicho que la historia de la medicina puede ser expuesta según tres pautas metódicas, correspondientes a otros tantos grupos de lectores: el exiguo que forman los historiadores del saber médico, el más amplio de los que componen y leen tratados de historia general, porque no es posible acercarse a la deseable "historia total" sin tener en cuenta lo que sobre cada situación histórica de la vida humana puede y debe enseñar el historiador de la medicina, y el todavía más extenso que constituyen –potencialmente, al menos– los médicos deseosos de conocer el origen y la formación de lo que como tales médicos saben, piensan y hacen. Cada una de estas tres pautas tiene sus exigencias y sus reglas; y no es difícil advertir que las propias de la tercera son el cuidadoso atenimiento a lo esencial –en este caso: la deliberada limitación a lo que realmente importa al médico reflexivo– y la suficiente posesión del arte de exponer con claridad y buen orden.

Ejemplarmente las cumple el libro que ahora comento, destinado a mostrar la génesis y la estructura de la hasta hoy máxima hazaña de la investigación médica, la elaboración de una patología y una terapéutica científicas mediante la consecuente aplicación de los principios y métodos de la ciencia natural, tal y como fueron concebidos en el siglo xix: observación directa e instrumental de la realidad, empleo sistemático de la medida, práctica del experimento conforme al modelo instaurado por Galileo y completado por Claudio Bernard, obtención de certidumbres causales objetivamente fundadas. "La medicina será ciencia natural –dijo solemnemente Helmholtz–, o no será nada." Como López Piñero apunta en las últimas páginas de su libro, la empeñada ejecución de esa consigna no podía conceder todo lo que realmente pide la atención médica al enfermo; pero tanto en lo tocante al conocimiento de la enfermedad como en lo relativo a su tratamiento, la fecundidad teorética y práctica de ese empeño ha sido, sin hipérbole alguna, fabulosa. Una rápida comparación entre lo que el diagnóstico y el tratamiento eran a comienzos del siglo xix y lo que son en la actualidad lo hace ver al más miope y menos documentado.

Tras una breve introducción, en la cual son sumariamente expuestos "los intentos de crear una patología *moderna* durante los siglos xvii y xviii", el cuerpo del libro se ordena en cuatro capítulos. "La escuela anatomoclínica de París" es el título del primero de ellos, consagrado a mostrar lo que fue la espléndida obra de la medicina francesa desde los precursores e iniciadores del método anatomoclínico, con Pinel, Bichat y Laennec a su cabeza, hasta los clínicos "escépticos", como Trousseau, y los "eclécticos", como Andral, que brillaron durante el reinado de Napoleón III. La atinada distinción entre un "París temprano", un "París central" y un "París tardío" y el mencionado discernimiento entre clínicos escépticos y clínicos eclécticos –aunque Trousseau menospreciase menos de lo que parece el valor médico del laboratorio y la estadística– permiten a López Piñero exponer con brillantez la dialéctica interna de esa importantísima aportación a la medicina actual.

No menos importante fue la estudiada en el capítulo "Patología celular y fisiopatología en la Alemania de la segunda mitad del siglo xix". La concepción celular y dinámica de la lesión anatómica (Virchow) y la patología experimental (Traube, Cohnheim), biofísica (Wunderlich, Vierordt) y bioquímica (Frerichs, Naunyn) –en definitiva, la consideración de la enfermedad como un proceso a la vez morfológico y energético-material– son expuestas con precisión y nitidez sobresalientes, y el lector atento adquiere *sans larmes*, al contrario, con gozo, una clara idea de lo que fue y cómo el verdadero arquetipo de la visión científico-natural de la patología. A él justamente se refería la programática consigna de Helmholtz antes consignada.

A la vez que Claudio Bernard, desde la fisiología, exponía genialmente los principios teóricos y metodológicos de la patología experimental –por cierto: con influencia harto mayor en Alemania que en su propio país, excesivamente fiel a la tradición laennequiana–, la mentalidad anatomoclínica más depurada tuvo un espléndido canto de cisne en Charcot, tanto en su maravillosa actividad nosográfica como en la mucho más discutible y discutida que durante los últimos lustros de su vida dedicó al estudio de la histeria, y el eclecticismo clínico descolló en internistas tan eminentes como Potain, Dieulafoy y Bouchard. Tal es el contenido del capítulo "De la patología experimental al concepto de psicogenia en la Francia de la segunda mitad del siglo xix", enteramente equiparable en calidad a los dos anteriores.

Entre tanto, ¿qué pasaba al otro lado del Canal de la Mancha? La bien documentada respuesta de López Piñero reza así: "La medicina de laboratorio y la explicación de la enfermedad como un fenómeno biológico integrado en Gran Bretaña, durante la segunda mitad del siglo xix". La anatomía patológica microscópica fue excelentemente cultivada en Gran Bretaña por Bennet, Wilks y Gull, y la fisiopatología bioquímica por Laycock, Bence Jones y Pavy; pero la máxima contribución británica a la patología científica del siglo xix fue la obra de Jackson, excelentemente estudiada por el propio López Piñero en otro de sus libros. Jackson fue, en efecto, el genial pionero de la concepción formalmente biológica de la neuropatología, y por consiguiente el primero de los médicos que lograron superar, asumida en un nivel explicativo superior, la orientación puramente fisicoquímica de la patología científico-natural que prevaleció entre los fisiopatólogos alemanes de la pasada centuria.

Con Virchow, Naunyn, Dieulafoy y Jackson entramos en la primera década de nuestro siglo. A la clara luz de este libro y teniendo en cuenta, por añadidura, el enorme y justificado impacto que la entonces ya adulta microbiología médica produjo en todos, doctos o profanos, no puede extrañar que los médicos más representativos de esos años pensaran que la recta combinación de los resultados ya obtenidos por la anatomía patológica, la fisiopatología, la microbiología médica y la clínica sobre ella fundada constituía un *desideratum* científico punto menos que insuperable; no, naturalmente, porque no fuese

posible el progreso en esas cuatro líneas de la investigación, sino porque el esquema mental que había de ordenar los nuevos hallazgos se hallaba ya plenamente conseguido. ¿Era así?

La respuesta nos la da López Piñero en el capítulo que pone fin a su libro: "Las cuestiones pendientes: la explicación de las causas de las enfermedades y la individualidad del enfermo". La patología constitucional, la genética médica, la patología sociológica y la multiforme patología individual de nuestro siglo han añadido exigencias, motivos y saberes inéditos, no solamente más sutiles hechos complementarios, al saber patológico de fines del siglo pasado, y han puesto a la mente del médico ante el nada fácil problema de construir una patología real y verdaderamente humana y nueva.

Estoy plenamente seguro de que los médicos españoles que lean *Ciencia y enfermedad en el siglo XIX* –y también los no españoles si, como es de desear, este libro es traducido a otros idiomas– entenderán con profundidad mayor y más firme fundamento lo que como médicos saben, y descubrirán con ello que también en medicina es fecundo el ejercicio de la razón histórica. Al término de mi carrera universitaria, nada será más satisfactorio para mí que ir viendo cómo López Piñero, y con él los seis u ocho docentes españoles capaces de hacerlo, dedican una parte de su actividad a exponer con la misma claridad y el mismo rigor todo lo que el historiador de la medicina puede y debe enseñar al médico culto.

Una mínima observación terminal: ¿por qué la investigación etiológica del siglo XIX –toxicología, microbiología médica– no es tratada en un capítulo de extensión semejante a la de los cuatro que constituyen el cuerpo del libro? ¿Acaso lo fundamental de esas dos disciplinas y el desmesurado proyecto de Klebs, la construcción de una patología general de base microbiológica, no fueron obra del siglo XIX? El par de páginas consagradas al tema en el último capítulo dista mucho de ser suficiente. Si, como espero, *Ciencia y enfermedad en el siglo XIX* es pronto reeditado, acaso no sea inútil esta leve observación mía. (P. L. E.)

LOCALIZATION AND ORIENTATION IN BIOLOGY AND ENGINEERING, por D. Varjú y H.-U. Schnitzler (ed.). Springer Verlag; Berlín, 1984. Se recogen aquí las comunicaciones presentadas en el congreso que, con el mismo título, se celebró en la Universidad de Tubinga en marzo de 1983 bajo los auspicios de la Sociedad Alemana de Cibernética. El propósito del congreso era contrastar las estrategias, artificiales y naturales, empleadas para la localización y la orientación. Entre los participantes había biólogos, médicos, físicos, ingenieros y matemáticos.

Hay en él dos grupos de trabajo bien diferenciados: los que describen técnicas artificiales y los que presentan los hallazgos referentes a mecanismos de control en los animales. Hace unas décadas, los partidarios de la biónica pensaban poder dar solución a muchos problemas de ingeniería a partir de las soluciones halladas en el mundo animal. Este punto de vista no ha resultado demasiado fructífero y, hoy por hoy, no parece que las semejanzas entre los seres vivos y los autómatas puedan generar ideas revolucionarias, como se desprende de las conclusiones de algunos trabajos presentados en este congreso. Con todo, los hallazgos en el terreno de la localización y la orientación en animales ofrecen un gran atractivo para los ingenieros que se dedican a temas afines, pues los mecanismos de aquéllos, muchas veces resultado de la cooperación de diferentes órganos y, generalmente, de gran precisión, se localizan en centros nerviosos del tamaño de un botón. Los métodos empleados por el biólogo en sus mediciones suelen provenir de la física o de la ingeniería. Por eso, las nuevas técnicas de localización y orientación mediante radar, sonar o satélites, pongamos por caso, pueden ayudarle a entender sus "sistemas" y sugerirle nuevas estrategias para su trabajo experimental.

El beneficio mutuo que puede obtenerse del intercambio de ideas entre estos dos tipos de científicos será mayor en la medida en que se esfuercen por utilizar un lenguaje común, dejando de lado detalles o descripciones que resulten ininteligibles a personas que trabajan en dominios diferentes. En el congreso al que nos estamos refiriendo este esfuerzo se llevó a cabo, por lo que se puede afirmar que se cumplieron, en buena medida, los objetivos que los organizadores se habían fijado.

El libro está dividido en cuatro grandes bloques que agrupan, cada uno de ellos, un conjunto de trabajos sobre temas afines. Una agrupación tan drástica en un dominio tan vasto resulta simpre parcial, pero los títulos elegidos ayudan al lector a orientarse.

El primer capítulo lleva por título "Localización, identificación y rastreo de emisores de señales", y está constituido por veinticuatro comunicaciones. Casi la mitad corresponden a métodos artificiales, que van desde problemas de fotometría de satélites, pasando por métodos digitales para procesar el sonido, hasta los de localización acústica. Entre los trabajos en sistemas vivos destacan los de localización eléctrica en algunos peces, detección del sonido en ratones y uno sobre el control humano del movimiento manual hacia un objeto.

El segundo capítulo se titula "Orientación y control de dirección" y en él predominan los estudios de sistemas naturales. Diecisiete trabajos, en total, forman este capítulo. Abundan los estudios sobre la determinación de los mecanismos optomotores en insectos y mecanismos de orientación en insectos y palomas mensajeras.

En el tercer capítulo se agrupan diez trabajos bajo el título "Localización e identificación de objetos mediante sistemas activos". Los dedicados a sistemas artificiales plantean y solucionan los problemas de control del tráfico aéreo mediante redes de radares y desarrollan métodos para evitar las colisiones entre aviones en vuelo o barcos. Entre las situaciones biológicas que se abordan cabe destacar la "Eficacia de los sistemas de sonar en los murciélagos", un estudio extenso y detallado de la localización y orientación por corrimiento Doppler del eco de los ultrasonidos emitidos por ese animal o por sus presas, los insectos.

El cuarto capítulo recoge los trabajos –doce– sobre "Navegación, migraciones de aves y palomas mensajeras". Uno de los artículos está dedicado a la descripción histórica de los métodos de navegación de los nativos de las islas del Pacífico, océano donde se dan fuertes corrientes marinas y zonas con vientos dominantes violentos. Los sistemas de navegación de satélites se describen brevemente en varias comunicaciones. Siete artículos se ocupan de las migraciones de las aves, con especial atención hacia la orientación de las palomas mensajeras. Son trabajos eminentemente descriptivos en los que no se explican los mecanismos que permiten al animal orientarse; se limitan a exponer estadísticas de las trayectorias. (Los trabajos sobre los mecanismos están recogidos en el capítulo dos.) Hubiera sido interesante incluir algún trabajo sobre la navegación de peces y ballenas (C. P.)

NEUROBIOLOGÍA, por Gordon M. Shepherd. Editorial Labor; Barcelona, 1985. La neurobiología es una de las áreas científicas de mayor expansión y figura en lugar preferente en los programas de investigación de muchos países desarrollados; en cuyo contexto el libro de Shepherd ocupa un puesto

de privilegio. Trátase de un campo multidisciplinario donde convergen las ciencias biomédicas, las ciencias físicas y las del comportamiento. El objetivo de la neurobiología, según Shepherd, es "el estudio de las células nerviosas y de las formas en las que están organizadas para formar sistemas nerviosos, los cuales median la conducta animal".

Siguiendo esta idea, su libro se estructura partiendo del estudio de la neurona (la célula nerviosa) para pasar luego a la descripción de los diferentes sistemas que la asociación neuronal produce. La neurona es una célula altamente especializada para la producción, transmisión y procesamiento de señales e impulsos. Su individualización histológica por Ramón y Cajal fue la última y la más difícil de probar dentro de todos los tipos de tejidos, y llevó también a la idea, hoy día demasiado simplista, de su individualidad funcional. La complejidad estructural que ahora conocemos en las diferentes variedades de uniones químicas y eléctricas entre las distintas partes de las neuronas, amplía necesariamente su concepto como unidad funcional. Los siete capítulos dedicados al estudio histológico y ultraestructural de la neurona, de la sinapsis, el potencial de membrana, el potencial de acción, los potenciales sinápticos, los neurotransmisores y neuromoduladores, y el desarrollo, plasticidad y muerte de la neurona, constituyen una visión actualizada y rigurosa de los mecanismos celulares básicos que sustentan el edificio de la neurobiología.

A continuación se exponen los sistemas sensoriales, los sistemas motores y los sistemas centrales, conservando en cada uno de ellos una estructura expositiva similar, en la que se resalta el papel fundamental que estos diferentes sistemas neuronales desempeñan como soporte de las conductas de los seres vivos desde las más sencillas en los invertebrados hasta las más complejas en el hombre. Los llamados sistemas centrales están anatómicamente dispersos, constituidos por circuitos neuronales que se superponen unos a otros; se definen por sus funciones, que exigen un comportamiento coordinado de todo el organismo y se extienden temporalmente a lo largo de períodos extensos, de días y hasta de años; tales son la vigilia, el sueño y otros biorritmos, la alimentación, el apareamiento, la emoción, el aprendizaje o la memoria. Los progresos realizados en los últimos años para la comprensión de los fundamentos bioquímicos, anatómicos y fisiológicos de todas estas complejas conductas "observables" mediadas por el sistema nervioso son admirables. El último capítulo del libro está dedicado a la corteza cerebral del hombre y a su comportamiento, y ahí se alcanza el techo del método neurobiológico, al menos por ahora, pues las más complejas, íntimas y "no observables" conductas del hombre escapan a la correlación físico-química o neurofisiológica.

En conjunto, el libro de Shepherd es excelente, con magníficos esquemas y una bibliografía selecta y actualizada. La obra está diseñada según el propio autor para servir de soporte a un curso universitario avanzado y especializado dentro de la biología, lo cual se dará probablemente de forma excepcional en España. En mi opinión, esta *Neurobiología* puede ser muy útil para muchas otras personas que en su trabajo tienen relación con el sistema nervioso, dada la enorme cantidad de información que contiene.

Los investigadores en determinadas áreas de la histología, anatomía o farmacología del sistema nervioso encontrarán en ella un compendio útil y moderno de las relaciones multidisciplinarias de su propia línea de trabajo. Neurólogos y neurofisiólogos clínicos pueden poner al día sus conocimientos fundamentales leyendo cualquier capítulo, y lo pueden usar como libro de consulta para detalles precisos. A los estudiantes de medicina, biología y veterinaria, la obra les ofrece una visión integrada y funcional del sistema nervioso. Finalmente, el libro es altamente recomendable para todos los que trabajando en el área de las ciencias de la conducta y de las relaciones sociales, como psiquiatras y psicólogos, quieran profundizar en su fundamento biológico. (J. J. Z.)

THE WONDER OF BEING HUMAN. OUR BRAIN AND OUR MIND, por Sir John Eccles y Daniel N. Robinson, Macmillan Publishers; Londres, 1984; 182 páginas. Eccles es premio Nobel de medicina por sus trabajos en neurofisiología. Robinson, catedrático de psicología en la Universidad de Georgetown, preside la división de historia de la psicología de la "American Psychological Association". Ambos comparten un mismo interés: la ciencia y el hombre, sus relaciones mutuas. Y en este libro, de fácil y subyugadora lectura, van desgranando sus puntos de vista sobre las principales cuestiones que preocupan, no sólo al neurólogo de laboratorio, sino también al hombre de la calle: la frontera entre lo vivo e inerte, la conciencia, las bases de la ética, el lenguaje en su relación con el pensamiento y el cerebro, la inteligencia artificial, la libertad y la responsabilidad moral.

La idea directriz es resaltar que, de los avances actuales de las distintas ramas de la ciencia, se desprende una visión del hombre que refuerza el carácter único de la persona, responsable de su comportamiento y de su relación con el medio. Como ya hiciera Cajal con las supuestas razones de químicos y tropistas que reducían a sistemas físicos la singularidad humana, en la exposición de Eccles se desvanecen las nuevas versiones del reduccionismo. Corre a cargo de Robinson la sistematización de esas nuevas formas y los distintos frentes en que se atrinchera, y cuyos postulados más significativos serían los siguientes: la ciencia es el tribunal de última instancia para todo tipo de cuestiones; los valores morales pertenecen al ámbito de la subjetividad o cada individuo fija sus normas; la subjetividad vendrían a ser el estado termodinámico en que nos encontramos. Afirmaciones que, si bien muy pocos aceptarían así expresadas, es obvio que impregnan bastantes actitudes que damos por científicas.

No es la primera vez que Eccles llega al lector español. En colaboración con Popper escribió *El yo y su cerebro* (Editorial Labor, Barcelona), donde razonaba, desde su especialidad, la necesidad de apoyarse en el dualismo alma-cuerpo, con aquella creada, para explicar el comportamiento único del hombre. Allí sostiene la tesis interaccionista, basada en los "módulos abiertos" de la corteza cerebral. Esta tesis ha encontrado críticos, obviamente entre los materialistas, pero también en espiritualistas que no ven claro ese interaccionismo. El lector hallará aquí, de un modo mucho más breve y asequible, el núcleo de su argumentación. Y, en todo caso, parece claro que se plantea un problema real e importante: el influjo de la voluntad sobre el organismo, sean cuales sean las explicaciones del hecho. Eccles ilustra las descripciones histológicas del cerebro con agudas referencias al lenguaje, la memoria y la voluntariedad; y se detiene en el alcance de los experimentos relevantes sobre aprendizaje en los chimpancés.

Dentro de su dominio de investigación, Robinson distingue certeramente entre el darwinismo científico de "El origen de las especies" de 1859 y el darwinismo psicológico de "El origen del hombre" de 1871: el primero se sitúa en la línea del evolucionismo biológico que debe valorarse de acuerdo con la genética de poblaciones, en tanto que el segundo se instala en lo que él llama

"falacia de los orígenes", en la que caen quienes confunden los problemas humanos con algunos factores que influyen en el origen de ellos.

Las conclusiones de Eccles y Robinson pretenden servir de base para un humanismo coherente con la ciencia, en el que se insinúan caminos positivos para la valoración de la persona, de la libertad y de la ética, sin eludir la cuestión del significado de la vida humana. Se trata de temas perennes, examinados a la luz de los resultados de la ciencia actual, que ponen de manifiesto el enorme impacto de ésta en nuestra sociedad, y pueden servir de estímulo a quienes se interesan por integrar la visión científica con las inquietudes en que se desenvuelve el hombre y la propia sociedad.

Una última observación. El "interaccionismo" de Eccles se entiende mejor si se tiene presente el "monismo fisicalista" de Herbert Feigl, que afirma la identidad entre los procesos mentales y los cerebrales. (Más tarde este último se desdiría de tal hipótesis.) Feigl admitía que su teoría presentaba dos puntos débiles: la explicación de la memoria y de la ética. A la vez, proponía su teoría como hipótesis científica, verificable empíricamente. Es la neurofisiología la que debía decidir si era o no correcta. Eccles acepta el desafío y, neurofisiología en mano, pretende mostrar científicamente que en el cerebro hay una "plasticidad" sobre la que podemos actuar voluntariamente (por ejemplo, recordando a voluntad datos almacenados en la memoria y tomando decisiones diversas que provocan la activación de unos procesos cerebrales concretos y no de otros). Cuestiones de terminología aparte, se trata de problemas reales, y quien desee intervenir en ellos deberá aportar hechos comprobables. Eccles sostiene ante todo que *el yo*, cada persona humana, utiliza *su* cerebro, la maquinaria más perfecta que existe en el universo, y es capaz de utilizarlo voluntariamente, al menos en parte. (M. A.)

TRADICIÓ I CANVI CIENTÍFIC AL PAÍS VALENCIÀ MODERN (1660-1720): LES CIÈNCIES FÍSICO-MATEMÀTIQUES, por Víctor Navarro Brotons. Eliseu Climent Editor; València, 1985. Este libro, que obtuvo el premio "Vicent Peset Aleixandre" del año 1982, intenta aclarar uno de los puntos más oscuros de nuestra historia científica: cómo España se incorporó a las corrientes modernas de la ciencia después del fatídico siglo XVII en que, por las causas que sean, quedó desenganchada del quehacer cotidiano de los sabios de los distintos países europeos. Las líneas que preceden exponen el contenido del libro, que es mucho más amplio de lo que indica el título por dos razones; la primera, porque fueron valencianos una gran mayoría de autores que intentaron sintonizar con la ciencia europea de fines del siglo XVII: es el grupo de los innovadores, novatores o renovadores que aparecieron por las principales ciudades españolas de la época, pero con especial intensidad en Valencia; la segunda es que los textos de sus principales adalides conocieron una amplia difusión en la España de Carlos II y se sobrevivieron a sí mismos hasta la época de Fernando VI. El estudio de Víctor Navarro se basa en el análisis del contenido de esos libros y de los manuscritos que ha podido encontrar en Valencia sobre estas cuestiones.

Una breve biografía del autor tratado precede al análisis de su obra. Así desfilan por sus páginas José Zaragoza i Vilanova (1627-1679), Baltasar Iñigo (1656-1746), Juan Bautista Corachán (1661-1741), Tomás Vicente Tosca (1651-1723) y algún otro personaje de menor entidad, los cuales se citan en el texto o en las notas. Uno, el francés Claude François Millet Dechales (1621-1678), ocupa una mayor atención por el influjo que su *Curso de Matemáticas* ejerció entre los renovadores valencianos que ya a fines del siglo XVII organizaban tertulias (academias) en algunas casas para discutir los temas de filosofía natural con ayuda de su sola razón, aunque, eso sí, autocensurándose voluntariamente cuando rozaban temas –tal vez el único el del sistema copernicano– que habían sido condenados por la Iglesia. Y, aún así, el análisis de los textos realizado por Víctor Navarro muestra que su única precaución consistía en exponerlos como si de meras hipótesis se tratara.

A lo largo de toda la obra se ve el influjo del pensamiento de los jesuitas europeos, algunos de los cuales vinieron a España a enseñar matemáticas en el Colegio Imperial de Madrid, así como se hace hincapié en los autores extranjeros cuya obra fue estudiada y asimilada por los renovadores valencianos y luego expuesta por éstos en sus publicaciones. Cuando el texto se aparta del original utilizado, Víctor Navarro discute correctamente el porqué de las discrepancias, discusión que muchas veces le permite establecer el estado de la cuestión en la Europa contemporánea y de paso dar pistas al lector –a partir de la copiosa lista bibliográfica que figura como apéndice– que desee ampliar sus explicaciones. A simple vista se aprecia la dependencia de estos grupos renovadores de los autores franceses e italianos primero y luego, muy en segundo lugar, de los alemanes, holandeses, ingleses, etc. Lo que sí queda claro es que los libros científicos extranjeros eran conocidos en la España de la época a pesar del edicto de Felipe II y de la Inquisición y que muchos de los experimentos que se exponían en los mismos fueron realizados por sus lectores valencianos para justificar su "adhesión a la ciencia moderna no sólo con argumentos racionales, sino también en consideraciones de orden empírico" (pág. 92). Del mismo modo procuraron introducir en sus obras los escasos descubrimientos realizados por sus contemporáneos españoles (Izquierdo, Caramuel, Omerique).

La discusión por Tosca del movimiento de los proyectiles (págs. 180-187) y algunos problemas de óptica y astronomía cuyo origen se rastrea rara vez más allá del siglo XVI permite ver que estos autores (y lo mismo pasará con otros posteriores hasta cerca de fines del siglo XVIII) captan la realidad de la ciencia moderna, pero no encuentran muchas veces fluidez léxica ni sintáctica para expresar claramente sus ideas. De aquí las reminiscencias que afloran, de tarde en tarde, de términos medievales (*impetus*) o lo confuso de algunas de sus explicaciones. Esta oscuridad involuntaria, sin embargo, esconde verdades científicas nuevas e importantes.

El libro en sí es utilísimo y sería de desear que sirviese de ejemplo para que otros autores de Barcelona, Zaragoza, Sevilla, Madrid, etc., ciudades que albergaron en su seno grupos (academias) similares y casi coetáneos a los de Valencia, explorasen y explotasen los fondos locales para, a base de esas monografías, obtener en un futuro más o menos lejano una visión de conjunto de lo que pasó con la ciencia española en uno de los períodos en que nos es menos conocida. (J. V.)

EL UNIVERSO DESBOCADO, por Paul Davies. Biblioteca Científica Salvat; Barcelona, 1985. LA FRONTERA DEL INFINITO, del mismo autor y editorial. Aborda el primer libro la cosmología con la generación y destrucción del orden, de la estructura del universo, como hilo conductor. Tras un resumen del modelo teórico de la gran explosión ("big bang"), se hace un repaso del contenido y evolución del universo: galaxias, estrellas, sistema solar, origen y desarrollo de la vida, etcétera, hasta culminar en las sociedades tecnológicas. El autor muestra cómo los efectos

combinados de la gravitación y del segundo principio de la termodinámica presagian la disolución final del orden del universo, la transformación probable de éste en casi un vacío apenas ocupado por radiación cada vez más tenue y fría.

Es de destacar la gran capacidad de Davies para condensar, en un lenguaje muy claro y fluido, una enorme cantidad de información puesta al día. En las necesarias simplificaciones que introduce no se deslizan errores apreciables. Entre los numerosos aciertos de su presentación destacaría la manera tan gráfica de explicar la generación de orden en el universo a partir del retraso de los procesos que hacen tender al equilibrio con respecto a la expansión, al modo en que se inducen turbulencia y estructura en el gas confinado dentro de un pistón al descomprimirlo desplazando rápidamente el émbolo.

Estos mismos méritos en la exposición de las teorías físicas hacen lamentar un poco la considerable extensión que Davies dedica a especular acerca de las posibilidades de desarrollo y supervivencia de las sociedades tecnológicas, tanto en la Tierra como en otros posibles astros habitados; aunque tal vez ello le dé un mayor "interés humano" al libro. En todo caso, gustará sin duda a los lectores aficionados a la literatura de ciencia ficción, pues recoge algunos temas típicos de la misma, aunque tratando siempre de establecer la compatibilidad o incompatibilidad con las leyes físicas de esas mismas fantasías.

Son ya varios los libros que, con un propósito de divulgación, presentan con mayor o menor detalle el modelo cosmológico de la gran explosión. Su ejemplo más ilustre es tal vez *Los primeros tres minutos*, de Steven Weinberg. El libro de Davies es original, sobre todo, por dedicar no menos atención a la evolución posterior del universo, hasta la actualidad, y a su posible futuro, que a los instantes "iniciales" del mismo. El repaso a las posibles evoluciones "finales" es muy completo, a la luz de las teorías vigentes. Se encuentran a faltar, en cambio, algunas consideraciones acerca de los problemas que siguen planteándose en el marco del modelo dominante: el de la homogeneidad en relación con los "horizontes de sucesos" y la aportación a este respecto de los modelos inflacionarios; el del origen y naturaleza de las fluctuaciones de densidad que han dado lugar a la formación de las estructuras que observamos (galaxias, cúmulos de galaxias, supercúmulos). No se hace tampoco alusión a la aparente estructura celular o "filamentosa" observada a gran escala en el universo y a sus posibles explicaciones.

Por otra parte, aunque el modelo de la gran explosión sea el que tiene a su favor más pruebas observacionales y mayor coherencia física y sea, por tanto, el aceptado por la gran mayoría de astrónomos, el oponerle el "modelo estacionario" como única alternativa imaginable peca de dogmático y unilateral, máxime cuando, como Davies, se tiene la fantasía suficiente para no excluir del todo la posibilidad de que existan seres inteligentes a tal escala que su actuación se confundiera para nosotros con la de la naturaleza. Parecería, por lo que dice Davies, que la paradoja de Olbers excluyera absolutamente la existencia de un universo infinito. Basta, sin embargo, suponer que las galaxias se agrupan en cúmulos (como se observa), éstas en supercúmulos (lo cual se observa también), estos últimos en sistemas aún mayores (cosa que es objeto de investigación en la actualidad), y así sucesivamente, "ad infinitum", según una jerarquía de sistemas cuya densidad media fuera cada vez más pequeña.

Vayamos con *La frontera del infinito*. A principios de la década de los 30, S. Chandrasekhar estableció que una estrella que haya agotado sus fuentes de energía termonuclear no puede permanecer estable si su masa supera por entonces un límite bastante modesto: aproximadamente vez y media la masa del Sol. Se han observado estrellas con masas varias decenas de veces mayores y está bien claro que una fracción apreciable del total de estrellas de nuestra galaxia concluye su evolución termonuclear conservando una masa muy superior a ese límite. ¿Qué les sucede, pues, a dichas estrellas? La respuesta es que deben seguir contrayéndose indefinidamente, a falta de una fuerza capaz de equilibrar la de gravitación. El examen más atento de las condiciones físicas de ese proceso muestra, además, que lo harán de forma acelerada, en un colapso incontenible y casi instantáneo. Dicho colapso será, en principio, total: hasta que toda la estrella se reduzca a un punto, de densidad por ello infinita.

Esta inevitable conclusión del trabajo de Chandrasekhar le pareció entonces tan absurda a Eddington, el astrónomo más eminente de la época, que intentó refutarla con toda clase de falsos argumentos (que casi nadie discutió durante bastante tiempo). Décadas más tarde se vio que las interacciones nucleares, a densidades mucho más altas que las consideradas al principio por Chandrasekhar, podían desarrollar fuerzas capaces de sostener objetos de masas algo más elevadas: entre dos y tres veces la solar. (El margen refleja las incertidumbres que todavía afectan a la teoría de las interacciones nucleares.) Ello no alivia gran cosa la situación, pues aún seguirá habiendo muchas estrellas que superen el nuevo límite al final de su evolución. Las teorías actuales del colapso estelar predicen que en algunos de esos casos se producirá, juntamente con el colapso, una explosión que lanzará al espacio la mayor parte del material de la estrella. Se evitaría entonces el problema de un "cadáver" estelar demasiado masivo, pues lo que iba a quedar sería una estrella de neutrones, con una densidad del orden de los cien millones de toneladas por centímetro cúbico (¡pero no infinita!). La energía liberada en su formación tampoco sería infinita, aunque sí produciría un destello como el de cien mil millones de soles (una supernova).

Pero siguen existiendo casos en los que se cree que la explosión, de producirse, será insuficiente para eyectar el exceso de masa. Y basta con uno sólo para que se nos plantee el problema de la estrella colapsando hasta un punto y liberando una cantidad infinita de energía. La teoría general de la relatividad aporta una solución a este problema: se formará una singularidad en el continuo del espacio-tiempo, pero encerrada en un "horizonte" del cual ninguna información puede salir. Los "agujeros negros" cuya formación predice la teoría general de la relatividad son, por ahora, la salida más razonable que evita la liberación de cantidades infinitas de energía cuando "fallan" las supernovas. Como afirmaba recientemente Chandrasekhar: "hoy en día, los agujeros negros son objetos perfectamente clásicos".

Tales objetos "perfectamente clásicos" constituyen el tema central de este segundo libro de Davies. Empieza por una sencilla y muy clara exposición de los conceptos matemáticos implicados en la noción de singularidad, para introducirnos en las paradojas y problemas que plantearía la existencia de "singularidades desnudas". La "gran explosión" original puede considerarse una "singularidad desnuda". Un universo que finalmente colapsara (o recolapsara) formaría un inmenso agujero negro. Las dos obras de Paul Davis se complementan, pues, perfectamente. (R. C.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

MOVIMIENTO CAOTICO

SIMPLE MATHEMATICAL MODELS WITH VERY COMPLICATED DYNAMICS. Robert M. May en *Nature*, vol. 261, n.° 5560, págs. 459-467; 10 de junio de 1976.

REGULAR AND IRREGULAR MOTION. Michael V. Berry en *American Institute of Physics Conference Proceedings*, n.° 46, editado por S. Jorna, págs. 16-120; 1978.

TEMAS METAMÁGICOS. Douglas R. Hofstadter en *Investigación y Ciencia*, n.° 64, págs. 103-113; enero de 1982.

COMPORTAMIENTO CAÓTICO EN MECÁNICA NO LINEAL. Antonio F. Rañada en *Anales de Física*, serie A, vol. 79, págs. 67-84; 1983.

HOW RANDOM IS A COIN TOSS? Joseph Ford en *Physics Today*, págs. 1-8; abril 1983.

CRECIMIENTO, DIFERENCIACION Y REMISION DEL CANCER

CONTROL OF NORMAL CELL DIFFERENTIATION AND THE PHENOTYPIC REVERSION OF MALIGNANCY IN MYELOID LEUKEMIA. Leo Sachs en *Nature*, vol. 274, n.° 5671, págs. 535-539; 10 de agosto de 1978.

CONSTITUTIVE UNCOUPLING OF PATHWAYS OF GENE EXPRESSION THAT CONTROL GROWTH AND DIFFERENTIATION IN MYELOID LEUKEMIA: A MODEL FOR THE ORIGIN AND PROGRESSION OF MALIGNANCY. Leo Sachs en *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, vol. 77, n.° 10, págs. 6152-6156; octubre, 1980.

NORMAL DEVELOPMENTAL PROGRAMMES IN MYELOID LEUKEMIA: REGULATORY PROTEINS IN THE CONTROL OF GROWTH AND DIFFERENTIATION. Leo Sachs en *Cancer Surveys*, vol. 1, n.° 2, págs. 321-342; 1982.

ESTRUCTURA DE LAS COLAS DE LOS COMETAS

INTERPLANETARY GAS. XXIII. PLASMA TAIL DISCONNECTION EVENTS IN COMETS: EVIDENCE FOR MAGNETIC FIELD LINE RECONNECTION AT INTERPLANETARY SECTOR BOUNDARIES? M. B. Niedner, Jr., y J. C. Brandt en *The Astrophysical Journal*, vol. 223, n.° 2, págs. 655-670; 15 de julio de 1978.

STRUCTURES FAR FROM THE HEAD OF COMET KOHOUTEK, II: A DISCUSSION OF THE SWAN CLOUD OF JANUARY 11 AND OF THE GENERAL MORPHOLOGY OF COMETARY PLASMA TAILS. Malcolm B. Niedner, Jr., y John C. Brandt en *Icarus*, vol. 42, n.° 2, págs. 257-270; mayo, 1980.

THE COMET BOOK. Robert D. Chapman y John C. Brandt. Jones and Bartlett Publishers, Inc., 1984.

APLICACIONES DE LA CONJUGACION DE FASE OPTICA

OPTICAL PHASE CONJUGATION. Dirigido por R. A. Fisher. Academic Press, 1983.

NONLINEAR OPTICAL PHASE CONJUGATION. David M. Pepper en *The Laser Handbook: vol. 4*, dirigido por M. L. Stitch y M. Bass. North-Holland Publishing Co., 1985.

PRINCIPLES OF PHASE CONJUGATION. B. Ya. Zel'dovich, N. F. Pilipetsky y V. V. Shkunov. Springer-Verlag, 1985.

DEPOSITOS MINERALES PROCEDENTES DE FUENTES CALIENTES SUBMARINAS

HYDROTHERMAL PROCESSES AT SEAFLOOR SPREADING CENTERS. Dirigido por Peter A. Rona, Kurt Boström, Lucien Laubier y Kenneth L. Smith, Jr. NATO Conference Series, IV Marine Sciences, vol. 12. Plenum Press, 1983.

FUENTES TERMALES EN EL FONDO DEL OCÉANO. John M. Edmond y Karen von Damm en *Investigación y Ciencia*, n.° 81, págs. 52-66; junio, 1983.

DEFENSAS QUIMICAS EN PLANTAS SUPERIORES

CHEMICAL ECOLOGY OF INSECTS. Dirigido por William J. Bell y Ring R. Cardé. Sinauer Associates, Inc., 1984.

INSECTS ON PLANTS. D. R. Strong, J. H. Lawton y R. Southwood. Harvard University Press, 1984.

DATACION DE RADIOCARBONO MEDIANTE ESPECTROMETRIA

WORKING WITH RADIOCARBON DATES. H. T. Waterbolk en *Proceedings of the Prehistoric Society*, vol. 37, segunda parte, págs. 15-33; diciembre de 1971.

RADIOISOTOPE CLOCKS IN ARCHAELOGY. R. E. M. Hedges en *Nature*, vol. 281, n.° 5725, págs. 19-24; 6 de septiembre de 1979.

PROCEEDINGS OF THE ELEVENTH INTERNATIONAL RADIOCARBON CONFERENCE-SEATTLE. En *Radiocarbon*, vol. 25, n.° 2; 1983.

RECONOCIMIENTO DEL PARENTESCO EN LOS RENACUAJOS

GENETIC CONTROL FOR SIBLING RECOGNITION? Andrew R. Blaustein y Richard K. O'Hara en *Nature*, vol. 290, n.° 5803, págs. 246-248; 19 de marzo de 1981.

RANA CASCADAE TADPOLES AGGREGATE WITH SIBLINGS: AN EXPERIMENTAL FIELD STUDY. Richard K. O'Hara y Andrew R. Blaustein en *Oecologia*, vol. 67, n.° 1, págs. 44-51; 1985.

KIN RECOGNITION IN ANIMALS. Dirigido por David J. C. Fletcher y Charles D. Michener. John Wiley & Sons, Inc., 1986.

JUEGOS DE ORDENADOR

AN APL2 GALLERY OF MATHEMATICAL PHYSICS–A COURSE OUTLINE. Gregory J. Chaitin. IBM Research, P.O. Box 218, Yorktown Heights, N. Y. 10598; 1985.

DIRECT N-BODY CALCULATIONS. Sverre J. Aarseth en *Dynamics of Star Clusters*, dirigido por Jeremy Goodman y Piet Hut. D. Reidel Publishing Company, 1985.

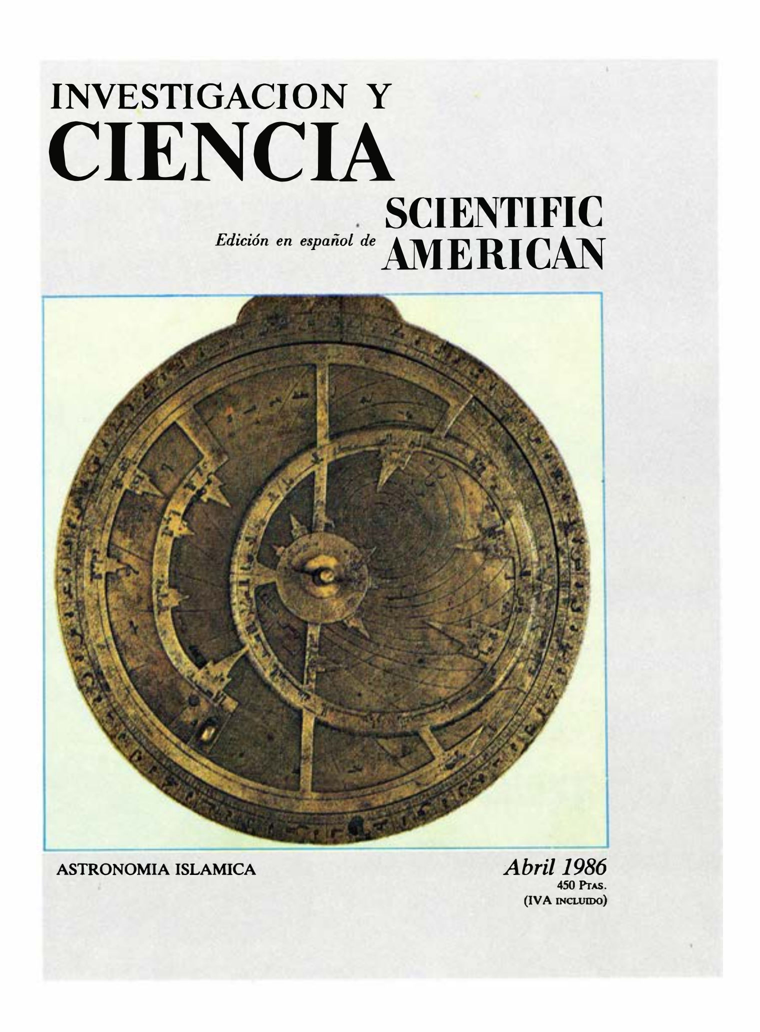
A UNIFIED N-BODY AND STATISTICAL TREATMENT OF STELLAR DYNAMICS. Alan P. Lightman y Stephen L. W. McMillan en *Dynamics of Star Clusters*, dirigido por Jeremy Goodman y Piet Hut. D. Reidel Publishing Company, 1985.

TALLER Y LABORATORIO

OPTICAL METHODS OF CHEMICAL ANALYSIS. Thomas R. P. Gibb, Jr. McGraw-Hill Book Company, Inc., 1942.

FUNDAMENTALS OF OPTICS. Francis A. Jenkins y Harvey E. White. Mc Graw-Hill Book Company, Inc., 1957.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LAS CELULAS *T* Y SUS RECEPTORES, por Philippa Marrack y John Kappler
La célula desempeña un papel decisivo en la capacidad del cuerpo para combatir las infecciones víricas, pero también participa en el rechazo de los injertos. Se ha descubierto la molécula que actúa en esos procesos.

REACCIONES QUIMIOCUANTICAS EN LA REGION DEL FRIO INTENSO, por Vitalii I. Goldanskii
Los efectos mecanocuánticos permiten que algunas reacciones, prohibidas por la física cuántica, se realicen en las proximidades del cero absoluto. Quizá se compruebe que las semillas de la vida se encuentran en el interior de las frías y oscuras nubes de polvo galáctico.

IMAGENES SISMICAS DE LOS BORDES DE PLACA, por John C. Mutter
Se obtienen imágenes estructurales de la corteza captando el reflejo de detonaciones artificiales provocadas desde buques de investigación.

EL CORAZON, GLANDULA ENDOCRINA, por Marc Cantin y Jacques Genest
Las aurículas segregan una hormona que interviene en el control de la presión y volumen sanguíneos.

TECNICAS DE LA CANTERA INCA, por Jean-Pierre Protzen
¿Cómo fue posible extraer sillares tan monumentales, desbastarlos y unirlos de tal modo que la hoja de un cuchillo no quepa entre ellos?

RECONSTRUCCION DE LA FILOGENIA DE LAS AVES POR COMPARACION DE ADN, por Charles G. Sibley y Jon E. Ahlquist
Las diferencias entre ADN revelan distancias evolutivas entre especies; ello nos permite reconstruir y datar las ramificaciones de los linajes aviares, al par que aporta un criterio de clasificación de los grupos actuales.

ASTRONOMIA ISLAMICA, por Owen Gingerich
Mientras la astronomía se marchitaba en la Europa Medieval, florecía en el Islam. Los astrónomos del Renacimiento aprendieron en los textos de los sabios musulmanes, que habían conservado y transformado la ciencia de los antiguos griegos.

EL ALTRAMUZ, por Luis López Bellido
Se ha despertado un gran interés por las leguminosas-grano, como alternativa de sustitución de la soja, y se han puesto en marcha numerosos estudios e investigaciones en Europa y otras regiones, con el fin de obtener nuevas variedades de altos rendimientos y mejor calidad nutricional.

